

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**FILIPPE ARTHUR FIRMINO MONHOL**

**UMA CONTRIBUIÇÃO EXPERIMENTAL AOS FUNDAMENTOS DA PROPAGAÇÃO  
DE UMA FRENTE DE COMBUSTÃO EM MEIO POROSO**

**VITÓRIA - ES**  
**2015**

FILIPPE ARTHUR FIRMINO MONHOL

UMA CONTRIBUIÇÃO EXPERIMENTAL AOS FUNDAMENTOS DA PROPAGAÇÃO  
DE UMA FRENTE DE COMBUSTÃO EM MEIO POROSO

**Dissertação** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de concentração Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Ferreira Martins

VITÓRIA - ES  
2015

**FILIPPE ARTHUR FIRMINO MONHOL**

**UMA CONTRIBUIÇÃO EXPERIMENTAL AOS FUNDAMENTOS DA PROPAGAÇÃO  
DE UMA FRENTE DE COMBUSTÃO EM MEIO POROSO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de concentração Ciências Mecânicas.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Prof. Marcio Ferreira Martins, *Ph.D***

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES  
Orientador

---

**Prof. José Joaquim Conceição Soares Santos, *D.Sc***

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES  
Examinador Interno

---

**Prof. Emanuel Negrão Macêdo, *D.Sc.***

Universidade Federal do Para - UFPA  
Examinador Externo

## **Lista de Publicações**

### **Artigos em periódicos**

1. MONHOL, F. A. F.; MARTINS, M. F. *Ignition by Thermal Radiation of Polyethylene and Human Feces Combustible Wastes: Time and Temperature to Ignition*. **Advanced Materials Research**, v. 911, p. 373–377, jun. 2014.
2. MONHOL, F. A. F.; MARTINS, M. F. *Cocurrent Combustion of Human Feces and Polyethylene Waste*. **Waste and Biomass Valorization**, v. 6, n. 3, p. 425–432, 2015.

### **Artigos em anais de eventos**

1. MONHOL, F. A. F.; MARTINS, M. F. *Combustíveis alternativos obtidos a partir de resíduos para utilização em fornos de pelotização de minério de ferro*. 69th ABM International Annual Congress, 2014, São Paulo-SP.
2. MONHOL, F. A. F. ; MARTINS, M. F. *Co-current smoldering combustion of fecal and plastic wastes*. 5th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation - WASTEENG, 2014, Rio de Janeiro - RJ.
3. MONHOL, F. A. F.; SANTOS, A. C.; ABREU, C. E. S.; DUQUE, J. V. F.; MARTINS, M. F. *Avaliação da propagação da frente de combustão em meio poroso reativo via análise de gás*. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, 2014, Uberlândia - MG.
4. MONHOL, F. A. F.; MARTINS, M. F. *The combustion front propagation: thermo-chemical structure by temperature in the bed and gas analysis*. V Encontro Científico de Física Aplicada, 2014, Vitoria – ES.
5. DUQUE, J. V. F.; MARTINS, M. F.; MONHOL, F. A. F. *A self-sustaining thermal cracking conversion process to turn polyethylene residues into a noble hydrocarbon*. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, 2014, Uberlândia - MG.
6. MEDEIROS, B.; ABREU, C. E. S.; MONHOL, F. A. F.; SCHIAFFINO, M.; MARTINS, M. F. *Análise dimensional do escoamento em gaseificadores de leito fixo*. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, 2014, Uberlândia - MG.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos aqueles que me auxiliaram direta ou indiretamente durante a realização deste trabalho.

À minha esposa Jéssica por sempre estar presente como amiga e companheira, a qual sempre me deu suporte e condição para que pudesse me dedicar ao mestrado.

À minha família, pelo apoio e carinho à minha decisão em seguir a carreira acadêmica.

Aos professores pela disposição de compartilhar seus conhecimentos e habilidades.

Ao meu orientador e amigo, Professor Marcio, pela confiança e orientação, incentivando a minha entrada no mundo acadêmico.

Sobretudo, agradeço a Jeová Deus pela vida, saúde e o privilégio de desfrutar o conhecimento que é mais importante do que o contido aqui ou em qualquer outro trabalho das mãos do homem.

A todos, muito obrigado!

## RESUMO

MONHOL, F. A. F. (2015), *Uma contribuição experimental aos fundamentos da propagação de uma frente de combustão em meio poroso*, Vitória, 89p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo.

A propagação de uma frente de combustão ocorre numa variedade de situações e para diferentes propósitos industriais. O desempenho desses processos precisa melhorar e ao mesmo tempo reduzir os níveis de emissões para atender às normas de emissões internacionais. Para isso é necessário um certo grau de conhecimento tanto do processo como dos fenômenos da combustão. Em todas as situações envolvendo a combustão, a propagação é iniciada por uma fonte de calor e, após a ignição do combustível, a frente de combustão alcança o combustível adjacente. Estudos anteriores mostraram a ignição e propagação de uma frente de combustão como um fenômeno complexo que depende de processos químicos, térmicos e físicos. O presente trabalho abordou os desafios encontrados durante uma abordagem empírica para análise da propagação de uma frente de combustão em leito fixo. A partir da utilização de combustíveis simulados foram analisados: a influência da composição do combustível no comportamento da ignição do mesmo, as características da propagação da frente de combustão (regime de combustão, retração do leito e estrutura da frente) e a influência da ignição do combustível na propagação da frente de combustão. Foi possível realizar um mapeamento, para diferentes composições, do comportamento da ignição de combustíveis sólidos. A partir dos resultados de propagação da frente verificou-se que ocorrem basicamente três estágios de combustão no leito: ignição, propagação e oxidação do carbono fixo remanescente. Através das análises de gás notou-se a existência de dois regimes de combustão no leito: limitada pela reação e limitada pelo oxigênio. Foi obtido que em leitos com alta porcentagem de material inerte, onde há maior estabilidade, há uma maior influência da ignição na frente de combustão. Assim, mostrou-se como esses conhecimentos são úteis em diversas aplicações e processos industriais.

**Palavras chave:** *frente de combustão, meio poroso, ignição, smouldering, retração*

## ABSTRACT

MONHOL, F. A. F. (2015), *An empirical contribution to the foundations of combustion front propagation in porous medium*, Vitória, 89p. M.Sc. Thesis - Federal University of Espírito Santo.

The combustion front propagation occurs in a variety of situations and for different industrial purposes. The performance of these processes needs to be improved and at the same time to reduce emission levels to meet the international standards. For this purpose, is needed a certain degree of knowledge of both processes of combustion phenomena. In all situations involving combustion phenomena, the propagation is initiated by a source of heat, and after fuel ignition, combustion front reaches the adjacent fuel. Previous studies have shown the ignition and the combustion front propagation as a complex phenomenon which depends on chemical, thermal and physical processes. This work focuses on the challenges encountered during an empirical approach to analyze the propagation of a combustion front in fixed bed. From the use of simulated fuels, it were analyzed: the influence of fuel composition on the behavior of its ignition, the characteristics of the combustion front propagation (combustion regime, shrinkage of the bed and the front structure) and the influence of fuel ignition in the propagation of the combustion front. It was possible to perform a mapping of ignition behavior of the solid fuel for different compositions. From the results of front propagation, it was found that, basically, three combustion stages occur in the bed: Ignition, Propagation and Oxidation of the remaining fixed carbon. Through gas analysis it was noted that there were two reaction modes present in the bed: reaction limited and oxygen limited. It was obtained than in bed with high content of inert materials, where there is greater stability, there is a greater influence from the ignition to the combustion front. Thus, it was shown how these skills are useful in various applications and industrial processes.

**Keywords:** *combustion front, porous medium, ignition, smouldering, shrinkage*

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Processo True in-situ (Castanier e Brigham, 2003).....	3
<b>Figura 2</b> – Incinerador de resíduos sólidos urbanos (Martins, 2008).....	5
<b>Figura 3</b> - Métodos de representação do combustível em análises empíricas. ....	14
<b>Figura 4</b> – Alto-ignição a partir de pilha de carvão bruto. Blair Athol mina de carvão em Clermont, New South Wales, Austrália (Martins, 2008).....	17
<b>Figura 5</b> - Curvas para identificar o tempo e temperatura de ignição (Monhol e Martins, 2015). ....	18
<b>Figura 6</b> - Regimes de ignição em função da taxa de aquecimento e diâmetro da partícula, adaptado (Essenhigh et al., 1989).....	19
<b>Figura 7</b> - Zonas de reação .....	25
<b>Figura 8</b> - Zonas de Reações em uma frente de propagação da combustão, adaptado (Martins, 2008). ....	26
<b>Figura 9</b> – Interação entre as fases, adaptado (Martins, 2008). ....	27
<b>Figura 10</b> - Colapso de uma <i>smouldering</i> durante extração em uma mina de carvão, Northern China (Rein, 2005). ....	28
<b>Figura 11</b> - Frente de combustão co-corrente: a) $\Delta < 1$ , Estrutura <i>reaction leading</i> ; b) $\Delta > 1$ , Estrutura <i>reaction trailing</i> ; c) $\Delta = 1$ , frente com acumulação de energia máxima (Aldushin et al., 1999).....	31
<b>Figura 12</b> – Efeito da taxa de fornecimento de ar na combustão em leito fixo, adaptado (Shin e Choi, 2000).....	32
<b>Figura 13</b> – Distribuição de temperatura no sólido em um leito de combustível, obtida por simulação, adaptado (Gómez et al., 2014).....	37
<b>Figura 14</b> – Efeito do teor inicial de umidade no combustível na distribuição da velocidade de fluxo, adaptado (Duffy e Eaton, 2013).....	37
<b>Figura 15</b> – Foto ilustrativa de uma frente de combustão em propagação, adaptado (Porteiro et al., 2012).....	38
<b>Figura 16</b> – Formato da frente propagando-se em um leito de xisto betuminoso, adaptado (Martins et al., 2010).....	39
<b>Figura 17</b> – Dispositivo de ignição. (a) Aquecedor Cônico. (b) Resistência elétrica do aquecedor. ....	41
<b>Figura 18</b> – Esquema com cotas do aparato além das superfícies de troca enumeradas (1-Reator, 2-Aquecedor e 3-Ambiente), medidas em mm. ....	41



<b>Figura 19</b> - Fator de forma associado a troca de calor por radiação entre os elementos infinitesimais de área $dA_i$ e $dA_j$ .	42
<b>Figura 20</b> - Esquema do fator de forma usado para simular a radiação do cone de aquecimento.	43
<b>Figura 21</b> – Representação da rede de troca radiante entre a superfície $i$ e as superfícies restantes.	45
<b>Figura 22</b> – Distribuição de temperaturas imposta pelo cone sobre o combustível. a) $55\text{kW/m}^2$ (duas resistências ligadas); b) $30\text{kW/m}^2$ (uma resistência ligada).	46
<b>Figura 23</b> - Esquema do dispositivo experimental utilizado.	47
<b>Figura 24</b> - a) Seção transversal na altura da entrada de ar. b) Seção transversal na meia altura da célula mostrando a coroa de termopares.	47
<b>Figura 25</b> - Foto do reator e aquecedor cônico.	48
<b>Figura 26</b> – Analisador de gás teste M/XL.	49
<b>Figura 27</b> – Bancada de ensaios.	50
<b>Figura 28</b> – Amostras de pedras de coque.	51
<b>Figura 29</b> - Peneira vibratória com diferentes tipos de faixas granulométricas.	51
<b>Figura 30</b> – Estufa utilizada para secar os materiais.	52
<b>Figura 31</b> – Coque conforme utilizado nos experimentos.	52
<b>Figura 32</b> - Amostras de polietileno conforme recebidas.	53
<b>Figura 33</b> – Polietileno conforme utilizado nos experimentos.	53
<b>Figura 34</b> – Areia conforme utilizada nos experimentos.	53
<b>Figura 35</b> - Comportamento da ignição do combustível para algumas composições.	59
<b>Figura 36</b> – Temperatura necessária para a ignição do combustível em função de sua composição.	61
<b>Figura 37</b> - Tempo necessário para a ignição do combustível em função de sua composição.	62
<b>Figura 38</b> – Verificação da propagação da frente após a ignição do combustível.	65
<b>Figura 39</b> – Evolução da temperatura no tempo para alguns termopares do leito para identificar a retração do leito (ensaio com Carvão - $V_d = 0,035\text{m.s}^{-1}$ ).	69
<b>Figura 40</b> – Alturas do leito ( $h$ ) para diferentes momentos da propagação da frente de combustão. a) $h = 360\text{ mm}$ ; b) $h = 340\text{ mm}$ ; c) $h = 315\text{ mm}$ ; d) $h = 180\text{ mm}$ ; e) $h = 135\text{ mm}$ ; f) $h = 45\text{ mm}$ .	69

<b>Figura 41</b> – Retração do leito de combustível no decorrer do tempo (Vd é a Velocidade de Darcy) .....	70
<b>Figura 42</b> – Análise de gás na saída do reator para os ensaios utilizando carvão. ...	72
<b>Figura 43</b> - Análise de gás na meia altura do reator num intervalo antes da frente alcançar o sistema de micro-amostragem. ....	73
<b>Figura 44</b> - Distribuição de CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> pelo reator durante os instantes iniciais (combustão limitada pelo oxigênio) e finais (combustão limitada pela reação) dos ensaios. ....	74
<b>Figura 45</b> – Observação visual da frente de combustão em propagação e sua distribuição de temperatura (Carvão/PE – Vd = 0,035m.s <sup>-1</sup> ) .....	75
<b>Figura 46</b> - Distribuição de temperatura na seção transversal da frente de combustão (Vd é a velocidade de Darcy). ....	75
<b>Figura 47</b> - Geometria da frente de combustão (Vd é velocidade de Darcy). ....	77
<b>Figura 48</b> - Inclinação da frente de combustão mais estável. ....	79

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Diferentes composições utilizadas nos ensaios (% em massa) .....	54
<b>Tabela 2</b> – Planejamento experimental.....	55
<b>Tabela 3</b> - Informações dos experimentos da segunda etapa .....	56

## SIMBOLOGIA

A	Área da superfície de transferência de calor [m <sup>2</sup> ]
a	Distância entre cone e combustível [m]
C	Capacidade térmica [W/°C]
E	Poder emissivo [W/m <sup>2</sup> ]
F	Fator de forma de radiação [adimensional]
G	Irradiação [W/m <sup>2</sup> ]
h	Altura de leito [mm]
J	Radiosidade [W/m <sup>2</sup> ]
q	Fluxo de radiação [W]
R	Distância entre superfícies de radiação [m]
r	Raio da superfície circular [m]
T	Temperatura [°C]
t	Tempo [s]
V	Velocidade [m/s]

### Gregas

$\Delta$	Indica a estrutura da propagação da frente [adimensional]
$\varepsilon$	Emissividade [adimensional]
$\theta$	Ângulo de zênite da superfície de radiação [rad]
$\rho$	Fração da irradiação que é refletida [adimensional]

### Subscritos

0	Ambiente ou estado morto
b	Indica a temperatura de pico
c	Combustível
d	Indica Velocidade de Darcy
g	Gás
i	Superfície emissora de radiação
j	Superfície incidente de radiação
m	Indica tempo médio

### Siglas e Abreviaturas

1-D	Unidimensional
2-D	Bidimensional
ASTM	American Society for Testing and Materials
CF	Carbono Fixo
CZ	Cinzas
DOE	Design of Experiments (Planejamento Experimental)
MV	Material volátil
MIS	Modified in-situ
PE	Polietileno
RSU	Resíduos Sólido Urbanos
RDF	Refused Derived Fuel (Combustíveis Derivados de Resíduos)

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>I</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>IV</b>
<b>SIMBOLOGIA .....</b>	<b>V</b>
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DA PROPAGAÇÃO DE UMA FRENTE DE COMBUSTÃO.....	1
1.1.1 Sinterização .....	2
1.1.2 Combustão in-situ.....	2
1.1.3 Gaseificação de biomassa .....	4
1.1.4 Incineração de resíduos sólidos urbanos (RSU) e combustão de biomassa.....	4
1.2 MOTIVAÇÃO .....	5
1.3 OBJETIVOS.....	6
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	7
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>8</b>
<b>ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>8</b>
2.1 MODELAGEM DO COMBUSTÍVEL.....	8
2.2 IGNIÇÃO DO COMBUSTÍVEL.....	16
2.2.1 Critérios para identificar o momento de ignição do combustível.....	17
2.2.2 Ignição de um combustível em leito fixo .....	18
2.2.3 Influência da composição do combustível .....	21
2.3 PROPAGAÇÃO DA FRENTE DE COMBUSTÃO .....	23
2.3.1 Fenômenos que ocorrem durante a propagação da frente .....	24
2.3.2 Combustão <i>smouldering</i> versus combustão <i>flaming</i> .....	27
2.4 REGIMES DE COMBUSTÃO .....	30
2.5 RETRAÇÃO DO LEITO DE COMBUSTÍVEL.....	33

2.6 INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA IMPOSTA PELA FONTE DE IGNIÇÃO NA PROPAGAÇÃO DA FRENTE .....	35
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>40</b>
<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>40</b>
3.1 DISPOSITIVOS EXPERIMENTAIS .....	40
3.1.1 Dispositivo de ignição .....	40
3.1.2 Reator de combustão .....	46
3.1.3 Analisador de gás .....	49
3.1.4 Bancada de ensaios completa .....	49
3.2 PREPARAÇÃO DO COMBUSTÍVEL .....	50
3.2.1 Preparação do coque .....	51
3.2.2 Preparação do Polietileno .....	52
3.2.3 Preparação da areia .....	53
3.2.4 Combustível simulado .....	54
3.3 METODOLOGIA PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS .....	54
3.3.1 Análise da influência da composição do leito na ignição e propagação da frente .....	54
3.3.2 Análise das características de uma frente de combustão em propagação .....	56
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>57</b>
<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>57</b>
4.1 INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO LEITO NA IGNIÇÃO E PROPAGAÇÃO DA FRENTE .....	57
4.2 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DE UMA FRENTE DE COMBUSTÃO EM PROPAGAÇÃO .....	67
4.2.1 Retração do leito .....	67
4.2.2 Regime de combustão .....	71
4.2.3 Influência da ignição na propagação da frente .....	74
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>80</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>80</b>

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>83</b>
--	-----------

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

A combustão dos sólidos é uma das mais antigas tecnologias da humanidade e vem sendo usada por milhares de anos para diferentes propósitos. A propagação da frente de combustão em sólidos ocorre numa variedade de situações e para diferentes processos, tais como incineração de resíduos, gaseificação, combustão in-situ, sinterização, processos metalúrgicos, dentre outros. Em todos esses casos a propagação é iniciada por uma fonte de calor e, após a ignição do combustível, a frente de combustão alcança o combustível adjacente. Em certos aspectos esse fenômeno pode ser muito útil pois pode ser aplicado industrialmente para um determinado objetivo. Porém, há também o lado negativo – incêndios urbanos e florestais, incêndios em depósitos de carvão a granel e depósitos de resíduos. Diversos setores como os de geração de energia, exploração de petróleo, tratamento de resíduos e proteção contra incêndios, têm estimulado pesquisas consideráveis na área da propagação de uma frente de combustão. A seguir, neste capítulo, descreve-se sucintamente diferentes aplicações industriais da combustão em meio poroso (que acontece em combustíveis sólidos).

### 1.1 APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DA PROPAGAÇÃO DE UMA FRENTE DE COMBUSTÃO

A combustão em meio poroso é altamente empregada em diferentes processos industriais. O desempenho desses processos precisa melhorar e ao mesmo tempo reduzir os níveis de emissões para atender às normas de emissões internacionais. Para isso é necessário um certo grau de conhecimento tanto do processo como dos fenômenos da combustão ocorrendo nele.



### 1.1.1 Sinterização

Na sinterização do minério de ferro há inicialmente uma preparação da granulometria, visto que os grãos mais finos são indesejáveis, pois diminuem a permeabilidade do ar na combustão, comprometendo a queima. Devido às altas temperaturas necessárias para a sinterização do minério de ferro, adicionam-se materiais fundentes (calcário, areia de sílica ou o próprio sínter).

Com a composição correta, estes elementos são levados ao forno onde a mistura é sinterizada. Em seguida, o material resultante é resfriado e britado até atingir a granulometria desejada (diâmetro médio de 5mm). O produto final deste processo é denominado de sínter (Zhao et al., 2015).

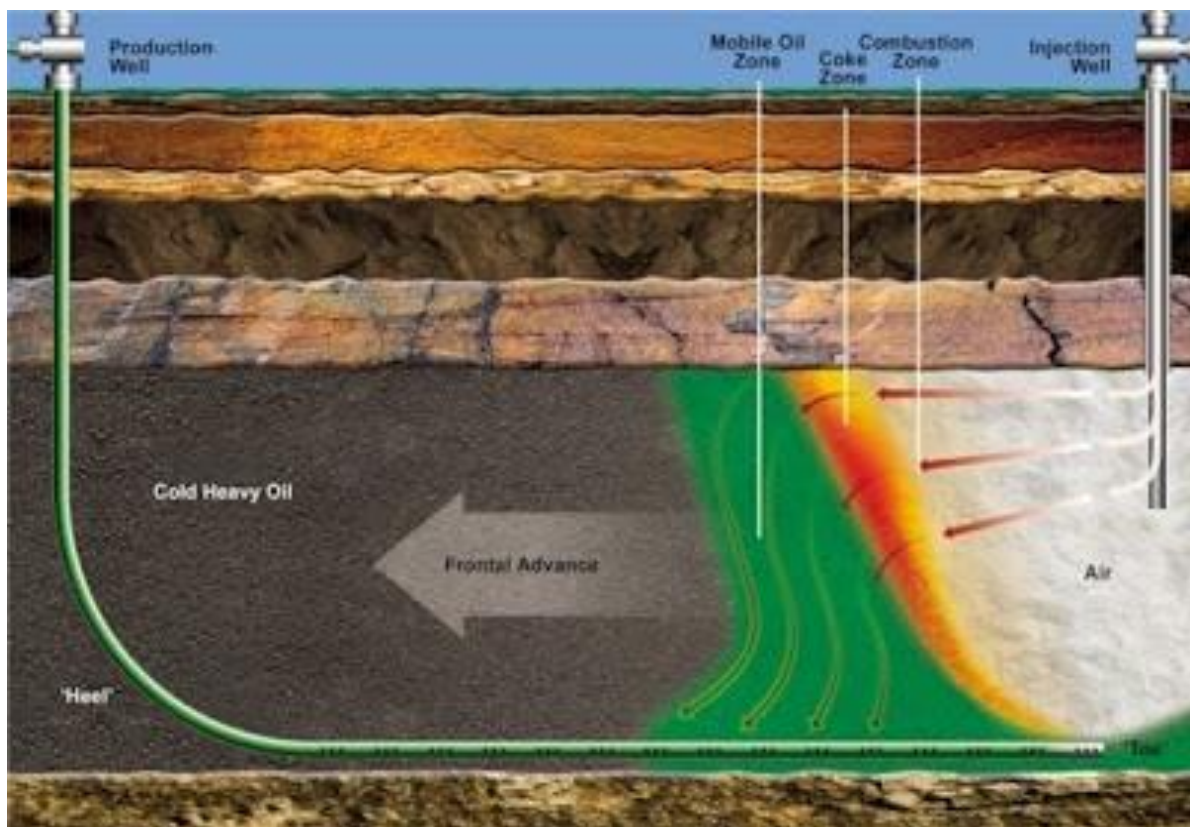
Outro processo é a sinterização do cimento. O cimento é um material fabricado na forma de um pó fino, com dimensões médias da ordem dos 50  $\mu\text{m}$ , que resulta da mistura de clínquer com outros materiais, tais como o gesso e escórias silicosas, em quantidades que dependem do tipo de aplicação e das características desejadas para o cimento. O clínquer, o principal constituinte do cimento, é produzido por transformação térmica a elevada temperatura em fornos apropriados, de uma mistura de material rochoso contendo aproximadamente 80% de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), 15% de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), 3% de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e quantidades menores de outros constituintes, como o ferro, o enxofre, etc. Estes materiais são normalmente escavados em pedreiras de calcário, ou margas, localizadas nas proximidades dos fornos de produção do clínquer. A matéria prima é misturada e moída finamente, e submetida a um processo de aquecimento que leva à produção final do clínquer. A energia necessária à secagem, calcinação e sinterização do clínquer, ou clinquerização, é obtida pela queima de uma variedade de combustíveis, como o carvão mineral e o coque de petróleo. Outros combustíveis também usados são o gás natural e os combustíveis alternativos, como pneus usados, resíduos de papel, resíduos de madeira, etc (Vuthaluru e French, 2015).

### 1.1.2 Combustão in-situ

A combustão in-situ consiste em se criar uma frente de combustão dentro da rocha reservatório para aquecer as regiões do poço, de tal modo que a viscosidade do

óleo diminua e seja mais fácil recuperá-lo (Akkutlu e Yortsos, 2003; Castanier e Brigham, 2003). Processos in-situ podem ser tecnicamente viáveis em formações mais ricas e profundas onde a rocha possui uma permeabilidade natural ou pode se tornar permeável por fratura. Entre os mais promissores processos in-situ destacam-se: *True in-situ*, *Modified in-situ* (MIS) e *Modified True in-situ*.

- *Processos True in-situ* não envolvem a indústria de mineração (**Figura 1**). A rocha é fraturada, o ar é injetado, em seguida, o xisto betuminoso é inflamado para aquecer a formação, e óleo de xisto se move através das fraturas em direção aos poços de produção. Dificuldades em controlar a frente de combustão e o fluxo de óleo podem limitar a recuperação de óleo, deixando áreas sem aquecimento e óleos sem recuperação.



**Figura 1** - Processo True in-situ (Castanier e Brigham, 2003)

- O processo MIS pode envolver a mineração. Uma caverna subterrânea é escavada e uma carga explosiva é detonada para preencher a caverna com escombros de xisto. A rocha é aquecida pela ignição da parte superior da formação e os fluidos são recuperados à frente ou abaixo da zona aquecida.

- Os processos *Modified True in-situ* melhoram o desempenho por aquecerem mais o óleo de xisto, melhorando o fluxo de gases e líquidos no interior da formação rochosa, e aumentando o volume e a qualidade do óleo produzido.

### 1.1.3 Gaseificação de biomassa

A gaseificação é um dos vários processos de conversão da biomassa. Este consiste em transformar a matéria orgânica através de uma combustão em condição de escassez de ar em relação à queima estequiométrica, ou seja, a quantidade de ar fornecido ao processo deverá ser menor do que aquele que garantiria a queima completa do combustível, de tal modo que os produtos gasosos gerados ainda têm potencial energético.

Nos processos de gaseificação a matéria orgânica é total ou parcialmente transformada em gás (gás de síntese) cujos principais componentes são: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>) e, dependendo das condições, metano (CH<sub>4</sub>), hidrocarbonetos leves, pequenas quantidades de particulados sólidos, compostos condensáveis (alcatrão e óleos), nitrogênio (N<sub>2</sub>) e vapor de água em diferentes proporções. Dentre as características do gás de síntese, destacam-se o alto teor de monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H<sub>2</sub>), que conferem ao gás de síntese um valor energético classificado entre baixo a médio (Hobbs et al., 1993; Kannan et al., 2013).

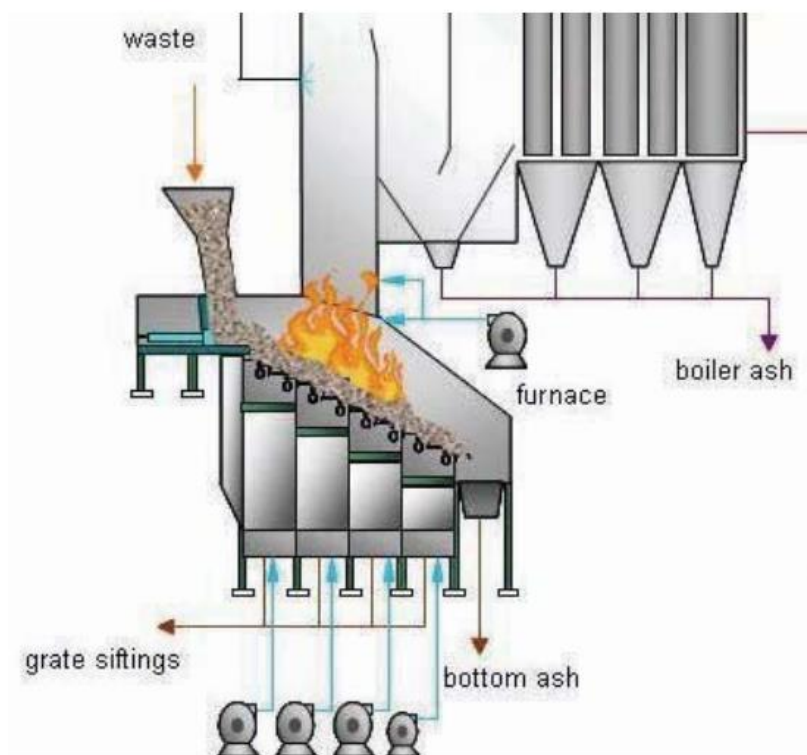
### 1.1.4 Incineração de resíduos sólidos urbanos (RSU) e combustão de biomassa

A incineração de RSU (Yang *et al.* 2003) e a combustão de biomassa em fornos ou caldeiras (Di Blasi *et al.*, 1999) são processos que também envolvem uma frente de combustão num meio poroso reativo.

Em um processo de incineração, os resíduos são depositados na grelha e o material se move lentamente para baixo sendo consumido pela frente de chama (**Figura 2**).

O gás gerado não pode sair da instalação de incineração enquanto não passar pelas etapas de tratamento e retirada de substâncias nocivas ao ambiente. A temperatura é de cerca de 950 ° C e o tempo de retenção dos resíduos no forno é de 45 minutos a 1 hora. A investigação experimental das características da combustão de resíduos

e as suas misturas geralmente é realizada em um leito fixo. Assim, pode-se entender os parâmetros da combustão, como a ignição e as de taxas queima, para melhorar o desempenho dos fornos de incineração e conversão termoquímica.



**Figura 2** – Incinerador de resíduos sólidos urbanos (Martins, 2008).

## 1.2 MOTIVAÇÃO

A propagação de uma frente de combustão é um processo complexo que depende de processos químicos, térmicos e físicos. Devido a essa complexidade, ainda persistem desafios para a investigação da propagação da combustão, tanto na parte numérica como do ponto de vista empírico. O presente trabalho foca-se nos desafios encontrados durante uma abordagem empírica para análise da propagação de uma frente de combustão. Alguns desses desafios serão abordados e a seguir os objetivos serão formulados para o presente trabalho.

*Influência do tipo de combustível na ignição e propagação da frente de combustão.* Diversos estudos vêm sendo realizados para se determinar a real influência da composição do leito de combustível no comportamento da ignição e propagação de uma frente de combustão. Porém numa análise experimental é difícil separar as

diversas variáveis envolvidas em um processo e se concentrar no estudo de apenas uma delas. Devido à complexidade de alguns tipos de combustível é comum se realizar uma simplificação ou modelagem do mesmo com o objetivo de facilitar a observação de sua influência no processo.

*Fenômenos que ocorrem durante a ignição e propagação da frente combustão em um combustível sólido.* Muitas dúvidas existem sobre quais fenômenos ocorrem durante a ignição e propagação da chama em um combustível sólido. Entender, observar empiricamente e conseguir medir instrumentalmente alguns fenômenos como: a temperatura e o tempo necessários para ocorrer a ignição, os regimes de combustão existentes durante o processo, retração do leito de combustível, etc, têm sido um grande desafio. Vários métodos têm sido empregados com esse objetivo, porém é cada vez mais necessário, devido à complexidade de alguns processos existentes, o desenvolvimento de novas técnicas para se conseguir visualizar detalhadamente o que está ocorrendo de forma a poder identificar os fenômenos existentes no processo.

Além disso, um outro desafio é apresentado: "*Como se pode determinar a influência da ignição do combustível na posterior propagação da combustão?*" A literatura sobre o assunto é ainda muito limitada. Porém, esse é um tema de grande interesse, pois se for possível, através da fonte de ignição, prever o comportamento de uma frente em propagação pode-se aumentar em muito o controle dos processos de combustão.

Hoje, as contribuições sobre esses temas estão centradas principalmente no campo da combustão de biomassa, incineração de resíduos sólidos urbanos (RSU) e prevenção de incêndios. Portanto, fazem-se necessários estudos mais abrangentes.

### 1.3 OBJETIVOS

Para se obter uma melhor compreensão geral sobre o fenômeno da combustão em meio poroso os seguintes objetivos foram determinados para este trabalho:

- Analisar empiricamente a influência da composição do combustível no comportamento da ignição do mesmo;

- Analisar as características da propagação co-corrente da frente de combustão como: regime de combustão, retração do leito e estrutura da frente através de dispositivos experimentais;
- Observar a influência da ignição do combustível na propagação da frente de combustão.

#### 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para atender aos objetivos acima descritos, além deste Capítulo introdutório, esta dissertação conta ainda com mais quatro (4) capítulos, além das Referências Bibliográficas.

O Capítulo 2 é dedicado à apresentação do estado da arte sobre alguns temas de interesse para o presente estudo, a saber: modelagem do combustível; ignição; propagação da frente de combustão; regimes de combustão; retração do leito; e influência da ignição na propagação da frente de combustão.

O Capítulo 3 descreve os dispositivos experimentais desenvolvidos para a observação das características da ignição e da propagação da frente de combustão co-corrente em leito fixo. Após isso, é apresentada a preparação do combustível bem como a metodologia e planejamento experimental utilizados.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e as análises e discussões dos mesmos. Está dividido em duas (2) seções:

- Influência da composição do leito na ignição e propagação da frente de combustão. Onde são discutidos os resultados de ignição e propagação da frente obtidos para diferentes composições de leito.
- Análise das características de uma frente de combustão em propagação. Onde são discutidos a retração do leito, os regimes de combustão existentes e a influência da ignição na propagação da frente de combustão co-corrente.

As Considerações Finais ficam no Capítulo 5, que traz a síntese dos resultados obtidos e as recomendações para trabalhos futuros.

## **Capítulo 2**

### **ESTADO DA ARTE**

Neste capítulo são examinadas e discutidas as principais contribuições encontradas na literatura voltadas para a análise da combustão em leito fixo. O capítulo está dividido em seis (6) partes. Primeiramente aborda-se os diferentes métodos de modelagem de um combustível. A segunda parte envolve as características da ignição do combustível e os métodos empíricos utilizados para sua investigação. A terceira parte abrange alguns dos conceitos fundamentais sobre a propagação da frente de combustão em meio poroso. Após isso, nas três últimas seções são abordadas algumas características da frente de combustão que são de interesse ao presente estudo, a saber: os regimes de combustão; a retração do leito; e a influência da ignição na propagação da frente de combustão. Os métodos e desafios existentes na observação dessas características são apresentados.

Geralmente as análises empíricas dos processos industriais são realizadas em pequena escala para, a seguir, serem aplicadas à situação real. O combustível sólido utilizado em cada um desses processos possui diferentes composições e características, o que certamente influencia o comportamento da frente de combustão. Sendo assim, para representar em menor escala o que está acontecendo é de suma importância uma análise a priori do tipo de combustível empregado e as possíveis simplificações, de acordo com o objetivo do estudo. Portanto, o próximo tópico abordará esse assunto.

#### **2.1 MODELAGEM DO COMBUSTÍVEL**

Na análise empírica de um processo de combustão, a escolha adequada do combustível é uma etapa essencial para um estudo bem fundamentado. A depender do que será analisado ou observado, determinados tipos de combustíveis são mais

apropriados do que outros. Por exemplo, em estudos envolvendo a modelagem do comportamento de uma frente de combustão em um leito de combustível sólido, geralmente utiliza-se o carvão (Hermansson e Thunman, 2011; Hobbs *et al.*, 1993; Pironi *et al.*, 2009), visto que é o combustível sólido mais abordado na literatura.

Utilizando apenas o carvão como combustível os estudos e aplicações ficam muito restritos e não é possível representar todos os fenômenos existentes em uma situação de interesse. Por isso, quando se deseja encontrar a influência da composição do combustível nos parâmetros de um determinado processo geralmente trabalha-se com diferentes tipos de combustíveis de composições estratégicas, de tal modo que seja abordada uma faixa de interesse (Mason *et al.*, 2015). Estudos como o de Porteiro *et al.* (2010) e Ryu *et al.* (2006) são exemplos disso. Porteiro *et al.* (2010) realizaram uma análise experimental da propagação de uma frente de combustão utilizando diferentes tipos de biomassa abrangendo as faixas de composição: 6 - 18% umidade, 61 - 69% de material volátil (MV) e 0 - 13% de cinzas (CZ). Foi observada uma clara dependência da velocidade de propagação da frente pelo teor de cinzas (CZ) e de umidade do combustível. De modo similar, Ryu *et al.* (2006) estudaram a influência das propriedades do combustível na combustão da biomassa e observou que a velocidade da frente de propagação é inversamente proporcional à densidade a granel do leito. Os autores chegaram a essa conclusão utilizando diferentes tipos de combustíveis.

A desvantagem dessa abordagem é a incapacidade de prever se os resultados obtidos são em decorrência das propriedades em si - por exemplo, aos diferentes teores de umidade de cada combustível, ou à densidade do leito -, ou ainda em decorrência de outra característica intrínseca ao combustível, que pode gerar alguma interferência, modificando os resultados. Ryu *et al.* (2006), por exemplo, observaram em seu estudo a presença de óxidos de potássio e cálcio, metais e outras substâncias em diferentes proporções para cada combustível utilizado. Essas substâncias podem gerar influências nos resultados de propagação da frente e, portanto, deve-se tomar cautela ao utilizar diferentes tipos de combustíveis pois pode-se confundir quais parâmetros realmente influenciam um determinado comportamento. Ou seja, devido à grande quantidade de parâmetros existentes em cada um dos tipos de combustível que afetam o comportamento da ignição e



propagação da combustão, e uma complexa interação entre as variáveis envolvidas, aumenta-se a dificuldade de se separar o principal responsável por um dado efeito.

É comum ainda a modelagem de um combustível complexo em um mais simples e bem conhecido, como por exemplo, a gasolina ser modelada como octano ( $C_8H_{18}$ ), o que é aceitável desde que o combustível escolhido conserve as principais características do original. Essa hipótese é bastante utilizada para combustíveis fluidos. Shin *et al.* (2008) adotaram em seu estudo o propano como combustível para representar os produtos formados pela pirólise em um incinerador. Ainda existem autores que modelam processos reativos em combustíveis sólidos utilizando combustíveis fluídos, como Dai *et al.* (2013). Os autores simularam a pirólise de um combustível sólido utilizando o metano escoando através de um queimador poroso, onde o dispositivo de ignição movimentava-se simulando o avanço da frente de pirólise. Van Blijderveen *et al.* (2013) realizaram um estudo experimental com objetivo de prever o comportamento da ignição em resíduos sólidos urbanos. Visto que esse resíduo é um combustível altamente heterogêneo, madeira e carvão foram usados como simplificação do combustível para encontrar a influência de alguns parâmetros. Para incluir o caráter não homogêneo, também foram realizados experimentos com combustíveis derivados de resíduos.

Para determinados processos de combustão de sólidos, alguns autores têm utilizado combustíveis modelo que apresentam características próprias e representam bem um determinado objeto de estudo. Por exemplo, Martins *et al.* (2010) utilizaram o xisto betuminoso como meio poroso para caracterizar a estrutura de uma frente de combustão propagando-se no arranjo co-corrente. De acordo com os autores, buscava-se um meio poroso que mantivesse uma situação 1-D de propagação da frente, de tal modo que a modelagem computacional do fenômeno fosse mais simples. Para isso, deveria haver uma estabilidade geométrica do leito após reagir. Porém, a maioria dos materiais usuais, constituindo um leito, sofre uma retração drástica ao longo do processo de pirólise/combustão. Como consequência, o diâmetro superior do leito diminui, e o fluxo de ar não impõe uma velocidade uniforme na secção transversal do leito, pois o ar circula preferencialmente nas bordas do leito, prejudicando o comportamento 1-D. O único material que preservou sua geometria ao longo do processo de combustão foi o xisto betuminoso. A

retração vertical do leito de xisto foi de apenas 3,5 % e portanto manteve-se uma situação 1-D tornando a situação menos complexa de se modelar.

Outra técnica de modelagem é a utilização de combustíveis simulados, onde se cria um determinado tipo de combustível utilizando materiais com diferentes composições, de tal modo que o comportamento desse combustível nas condições do estudo seja semelhante ao comportamento do combustível na situação real. Um grande exemplo disso são os resíduos sólidos urbanos simulados (Liang et al., 2008; Sun et al., 2015; Yang et al., 2003). Devido à complexidade dos resíduos sólidos urbanos utilizados como combustíveis em incineradores, geralmente utiliza-se essa simplificação.

Observa-se que os autores que trabalham com combustíveis sólidos simulados utilizam diferentes parâmetros para criarem uma composição que represente o combustível real. Alguns exemplos são mencionados a seguir:

Chiang et al. (2008) utilizaram algumas amostras de diferentes tipos de resíduos e substâncias presentes em resíduos sólidos urbanos para simular uma composição dos combustíveis derivados de resíduos (RDF). Foi utilizada uma mistura de amostras de papel, materiais têxteis, madeira, restos de alimentos e de plástico, constituídos para simular resíduos utilizados num incinerador. Foram adicionados ainda frações de água e algumas substâncias encontradas nesse tipo de resíduo como:  $\text{Ca(OH)}_2$ , Pb, Cd, Cr, Cu, Zn e compostos de acetato. Foi observado que com a quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  superior a 5%, a quantidade de HCl formado não variou significativamente.

Tao et al. (2010) utilizaram diferentes tipos de resíduos perigosos em diferentes proporções, conforme recebidos de uma empresa de proteção ambiental, para simular uma composição de resíduos sólidos perigosos presentes num incinerador urbano. Foi utilizado um combustível composto por: resíduos de tinta (24%), resíduos de alcatrão (27%), resíduos de emulsões (29%),  $\text{Ca(OH)}_2$  (13%) e papel (7%). As misturas destes resíduos foram preparadas por moagem em pedaços pequenos e extrudadas por uma máquina de rolo de conformação. O teor de umidade das amostras de resíduos foi variado secando as amostras a diferentes temperaturas. A vazão de ar e o teor de umidade geraram efeitos significativos sobre a velocidade de propagação da chama. O tamanho das partículas gerou efeitos leves sobre a velocidade de propagação.

Van Blijderveen *et al.* (2010) utilizaram em seu estudo uma mistura de lascas de madeira e pedras na proporção 20 e 40 % em peso. As pedras foram utilizadas para simular material inerte no combustível.

Um pouco mais criteriosos, os autores a seguir utilizaram métodos para quantificar os constituintes presentes nos combustíveis sólidos simulados de tal modo que fossem mais representativos.

Yang *et al.* (2004) utilizaram a relação em peso dos materiais constituintes do combustível. Os resíduos sólidos foram simulados como uma mistura de papelão e vegetais (batatas). Para determinar a quantidade de cada resíduo o autor obteve, através do trabalho de Sharifi (1990), a relação em peso entre o conteúdo de papel e de produtos alimentares em um incinerador de resíduos sólidos típico do Reino Unido. Assim, os autores utilizaram a proporção em peso entre o papelão e vegetais de 1,85:1. Água até 50% em peso foi adicionada à mistura para simular umidade nos resíduos sólidos. Foi encontrado que um aumento no nível de umidade no combustível produziu uma frente de chama de maior temperatura para fluxos de ar baixos.

Liang *et al.* (2008) e Sun *et al.* (2015) utilizaram as quantidades médias de cinza, umidade e carbono fixo (CF) presentes nos resíduos sólidos urbanos para determinarem a quantidade de cada componente dos resíduos sólidos simulados. Os autores utilizaram uma mistura de areia, vegetais, e papel de tal modo que simulassem as quantidades de cinza, umidade e teores de carbono fixo (CF) presentes nos resíduos sólidos urbanos na China. Os autores usaram um reator experimental de leito fixo para detectar as características da combustão desses resíduos sólidos urbanos simulados. Observaram que para maiores teores de umidade, a secagem do material foi mais lenta e as temperaturas e velocidade da frente de ignição foram menores.

Esse último método baseado na caracterização química imediata provavelmente seja o mais indicado pois também leva em conta as substâncias presentes no combustível e não só os materiais. Talvez se diga que a melhor opção seria utilizar a caracterização química elementar, porém a quantidade de elementos químicos não leva em conta as energias de ligação entre esses elementos. Assim, embora reproduza-se a mesma quantidade de cada elemento químico, talvez as quantidades de cada substância não sejam reproduzidas. Por exemplo, na caracterização

elementar se obtém um combustível possuindo 60% de carbono, porém não se sabe ao certo quanto desse carbono constitui-se em carbono fixo (CF) e quanto está presente nos voláteis. Desse modo, provavelmente o método utilizando a caracterização imediata seja o mais indicado.

Existe uma desvantagem em se utilizar diferentes tipos de materiais para se simular um dado tipo de combustível composto. Embora se consiga, com os diferentes materiais, se igualar as quantidades de MV, CF, umidade e cinzas do combustível real e do simulado (Liang et al., 2008; Sun et al., 2015), algumas substâncias secundárias presentes nos materiais (como sais, óxidos, etc) que serão classificados como cinzas, podem gerar interferências no comportamento das reações do combustível (Binkau et al., 2014; Ryu et al., 2006). Assim, um material utilizado como fonte de carbono fixo (CF) ou de material volátil (MV) pode possuir outras substâncias em quantidades significativas levando a uma representação errônea do combustível simulado.

Uma maneira de minimizar as interferências causadas por componentes não previstos nas análises de composição, é a utilização de materiais primários, ou seja, materiais puros que sejam compostos por praticamente uma única substância – seja por CF, MV, etc. Desse modo, a partir da matéria primária com a adição de algumas substâncias de interesse como: água, sais e óxidos (a depender do combustível que se deseja modelar) consegue-se obter qualquer composição com um mínimo de interferências de substâncias não previstas. Recentemente alguns autores já vem utilizando essa abordagem.

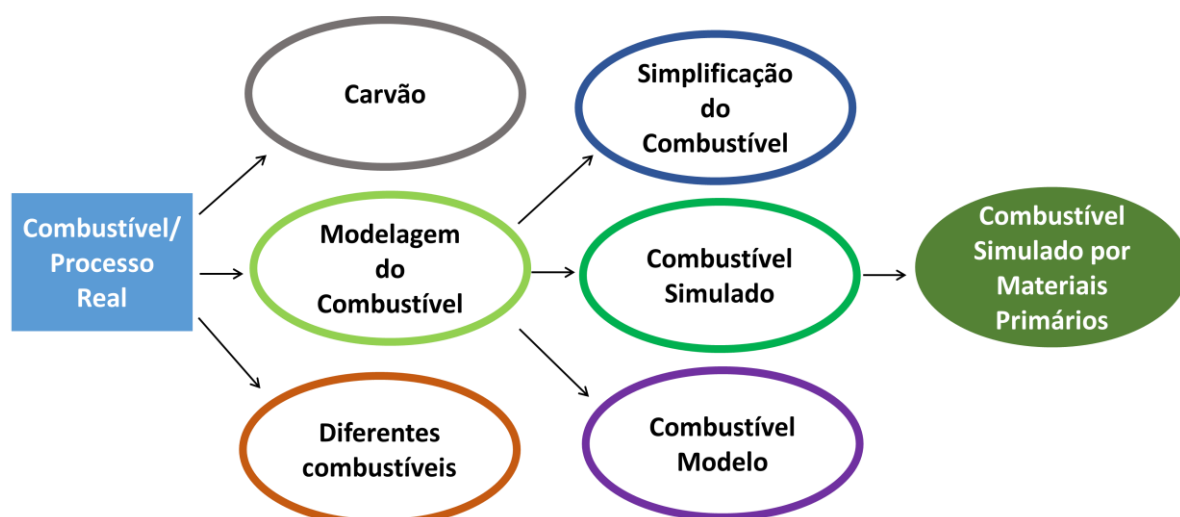
Por exemplo, Martins *et al.* (2010), que estudaram a propagação de uma frente de combustão co-corrente em um leito de um combustível com grande proporção de material inerte (cinzas), a saber o xisto betuminoso, utilizaram uma mistura de areia e carvão de alta qualidade (91% CF) numa determinada proporção para realizar um ensaio que se assemelhasse a um ensaio utilizando xisto betuminoso. Os resultados obtidos para o xisto e para o xisto simulado com carvão e areia foram semelhantes. Algumas pequenas diferenças observadas podem ser devido ao fato dos autores não terem utilizado na mistura o carbonato de cálcio, visto que esse elemento está presente em grandes quantidades no xisto betuminoso.

Binkau *et al.* (2014) utilizaram sais inertes misturados em combustíveis carbonosos constituídos na quase totalidade por CF apenas. Foi simulada uma possível

composição de poeiras provenientes da estocagem de combustíveis a granel. Como fonte de CF foi utilizado diferentes tipos de carvões de alta qualidade. Os sais foram o oxalato de cálcio, sulfato de amônio e fosfato de amônio. A fração de cada um desses elementos na mistura foi variada e vários combustíveis compostos foram formados.

Monhol e Martins (2014) realizaram ensaios com uma mistura de carvão de alto CF e areia para simular um combustível rico em material inerte. Duque (2013) utilizou uma mistura de polietileno (composto quase totalmente por MV), carvão e areia para obter resultados de propagação auto-sustentável da frente de combustão em meios porosos reativos visando a produção de hidrocarbonetos de alto valor agregado. Monhol e Martins (2015) realizaram ensaios com uma mistura de polietileno e carvão e obtiveram resultados da propagação da frente de combustão em arranjo co-corrente.

Assim, há diversas formas de se representar experimentalmente um combustível de um determinado processo. A **Figura 3** apresenta de forma esquematizada os métodos mais utilizados, conforme apresentados acima. Essa dissertação foca na modelagem por combustível simulado através de materiais primários visto ser, dentre os combustíveis simulados, a que apresenta menores interferências.



**Figura 3** - Métodos de representação do combustível em análises empíricas.

Em todos os trabalhos já citados foi necessário utilizar um método de homogeneização da mistura dos materiais constituintes do combustível simulado.

Para garantir uma mistura, mais homogênea possível, geralmente faz-se uma separação granulométrica dos materiais (na maioria dos casos com moinhos e peneiras) de tal modo que todos tenham a mesma granulometria. Quanto menor for a granulometria mais homogênea será a mistura. Associado à separação granulométrica utiliza-se, em seguida, uma técnica de mistura propriamente dita.

Martins *et al.* (2010), após realizarem a separação granulométrica entre 500 - 1000  $\mu\text{m}$ , prepararam um tipo de massa, pelo umedecimento da mistura de carvão e areia, misturaram intensivamente e em seguida inseriram a massa úmida dentro do reator de combustão, onde a massa foi seca durante a noite.

No estudo realizado por Tao *et al.* (2010) as misturas dos resíduos foram preparadas por moagem em pedaços pequenos e extrusão em uma máquina de rolo de conformação. Após isso uma separação granulométrica entre 20 - 50 mm foi realizada.

Chiang *et al.* (2008) misturaram os materiais com adição de 50 % em peso de água e utilizaram um prensa durante 30 min formando corpos cilíndricos de 50 mm de altura e 20 mm de diâmetro. Concentrações de metais foram ajustadas e incrementadas em pó.

No trabalho de Ryu *et al.* (2006) a mistura foi pré-processada por trituração, segregação e triagem e preparada por peletização em pastilhas de 7 mm de diâmetro. Os autores observaram que as pastilhas não eram tão homogêneas como as compostas por um único material. Isso pode ser devido ao fato da granulometria das partículas não serem tão pequenas quanto o necessário.

Um trabalho recente que aborda a eficiência do método de mistura em combustíveis simulados por materiais primários é o de Binkau *et al.* (2014). Os autores analisaram a influência do método utilizado para produzir as misturas sobre o comportamento de auto-ignição do combustível. Alguns sais foram misturados ao carvão de dois modos: como partículas sólidas secas (“não dissolvido”) e utilizando uma solução aquosa, com subsequente secagem para atingir o teor de umidade inicial do carvão (“dissolvido”), sendo que nessa última houve maior homogeneidade da mistura. O tipo da mistura teve uma influência sobre a temperatura de ignição. Observou-se que o sal dissolvido influencia mais na temperatura de ignição do que o sal não dissolvido, pois esta depende, por um lado da substância, mas, por outro lado, também do tamanho da amostra. Isso indica que quanto menor a granulometria mais homogênea e mais representativa será a mistura.

Assim, quando se modela um combustível através de materiais primários, a falta de homogeneidade da mistura - em relação ao combustível real - é um fator que deve ser atenuado ao máximo possível. No combustível real o CF, o MV, as cinzas e a umidade estão naturalmente distribuídos num determinado volume. No entanto, por mais eficiente que seja o método de mistura, isso não acontece no combustível simulado. Embora a hipótese mais adotada na utilização de um combustível simulado seja admitir a perfeita homogeneidade da mistura.

## 2.2 IGNIÇÃO DO COMBUSTÍVEL

A ignição é uma etapa primordial de um processo de combustão bem sucedido. Ela é geralmente considerada como o processo de início do fenômeno de combustão. Na prática, é importante compreender o comportamento da ignição dos mais diferentes tipos de combustíveis a fim de identificar um ponto ótimo para a sua injeção em combustores industriais (Jia et al., 2006).

Além disso, entender bem esse fenômeno auxilia muito na prevenção e controle da propagação da chama em incêndios florestais (Kim et al., 2006; Manzello et al., 2008), explosões e diversas outras situações. A própria motivação para o primeiro estudo sobre ignição de combustíveis sólidos, realizado por Faraday e Lyell (1845), foi um desastre que ocorreu em 1844, a explosão da mina de carvão Haswell Colliery na Inglaterra. Mais voltado para os nossos dias, um caso bem conhecido é a auto-ignição de materiais em locais de armazenamento. Materiais a granel são geralmente armazenados em quantidades de até milhares de toneladas ao longo de períodos de tempo prolongados. É bem conhecido que grandes quantidades de material combustível tendem a sofrer auto-ignição, mesmo se armazenado a temperatura ambiente (**Figura 4**).

A auto-ignição ocorre se o calor liberado a partir de uma baixa taxa de oxidação nas superfícies ativas das partículas não pôde ser dissipado através da superfície exterior do depósito. Isto leva a um aumento de temperatura, que por sua vez acelera ainda mais a reação gerando um “*loop*”, até que o material incendeia (Babrauskas, 2003). Dependendo do volume e forma do depósito, até mais do que um ponto de início pode ocorrer e iniciar a formação de pontos de combustão *smouldering* que ficam escondidos e podem emergir na superfície do depósito

depois vários dias, semanas ou mesmo meses após o início da auto-ignição. Assim, uma prevenção desse tipo de fenômeno através do entendimento da ignição do combustível é sempre preferível.



**Figura 4** – Alto-ignição a partir de pilha de carvão bruto. Blair Athol mina de carvão em Clermont, New South Wales, Austrália (Martins, 2008).

Muitos estudos têm sido realizados em relação à pirólise, gaseificação e combustão de combustíveis. Surpreendentemente, pesquisas na área da ignição são escassas. Portanto fazem-se necessários estudos nessa vertente da combustão. No entanto, em dispositivos experimentais é necessário identificar corretamente o momento em que esse fenômeno ocorre.

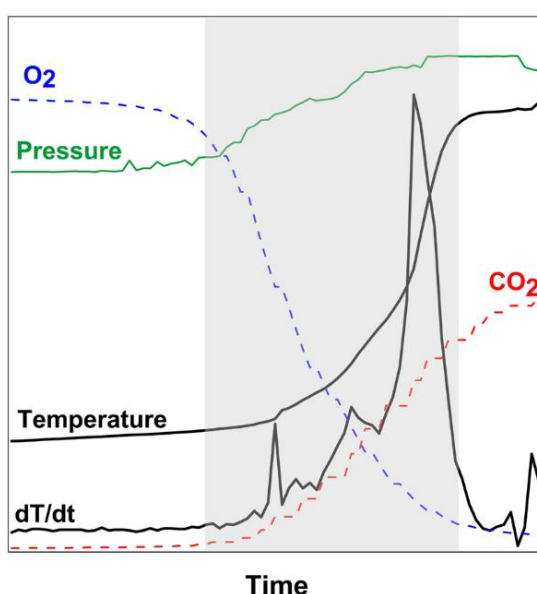
#### 2.2.1 Critérios para identificar o momento de ignição do combustível

Existem vários critérios para determinar experimentalmente o momento em que ocorre a ignição de um combustível. Por exemplo, o aumento de temperatura da partícula (Bu et al., 2014; Du, 1995), a inflexão do perfil temperatura vs. tempo (Du e Annamalai, 1994), análise da composição do gás produzido (Monhol e Martins, 2014; Van Blijderveen *et al.*, 2010; Wall *et al.*, 1988), taxa de aquecimento ( $dT/dt$ ) das partículas (Monhol e Martins, 2014; Sun e Kozinski, 2000; Sun e Zhang, 1998), aumento da pressão no leito (Monhol e Martins, 2014; Wildegger-Gaissmaier e Johnston, 1996), observação visual (Bu et al., 2014; Zou et al., 2015), visual



assessorado (Liu *et al.*, 2014; Yuan *et al.*, 2014) e através de pirometria (Riaza *et al.*, 2014).

No momento da ignição a taxa de aquecimento do combustível ( $dT/dt$ ), a pressão no leito de combustível e a porcentagem de  $CO_2$  nos gases de saída aumentam subitamente, enquanto que a quantidade de  $O_2$  diminui, indicando no perfil temperatura x tempo o instante e a temperatura na qual a ignição se inicia. A **Figura 5** mostra esse comportamento típico (para o caso do carvão) quando alguns critérios são satisfeitos (Monhol e Martins, 2015).



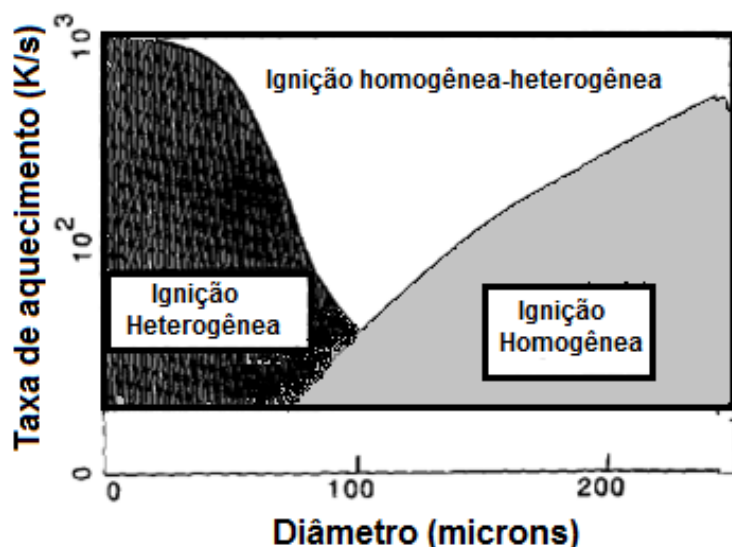
**Figura 5** - Curvas para identificar o tempo e temperatura de ignição (Monhol e Martins, 2015).

### 2.2.2 Ignição de um combustível em leito fixo

A grande maioria dos trabalhos sobre ignição de materiais combustíveis envolve a ignição de partículas isoladas (Essenhig *et al.*, 1989; Mason *et al.*, 2015; Riaza *et al.*, 2014), de tal modo que há informações bem fundamentadas para esse tipo de problema. Conforme o trabalho de Essenhig *et al.* (1989), a ignição das partículas de combustível pode ser atribuída a reações homogêneas (ignição na fase gasosa) ou reações heterogêneas.

De acordo com os autores, a ignição heterogênea envolve o ataque direto do oxigênio em toda a superfície das partículas do combustível, oxidando toda a matéria que seria de outra forma expelida como voláteis. Na ignição homogênea, o

passo inicial é a pirólise e logo após ocorre a ignição dos voláteis (Mecanismo de Faraday), seguido da ignição do CF. A **Figura 6** mostra um mapa dos regimes de ignição de acordo com as condições do ensaio.



**Figura 6** - Regimes de ignição em função da taxa de aquecimento e diâmetro da partícula, adaptado (Essenhig et al., 1989).

Alguns poucos estudos foram realizados para a situação onde há uma interação entre várias partículas. Dentre esses poucos, a maior parte se refere à partículas pulverizadas (Wall et al., 1988; Yuan et al., 2014; Zou et al., 2015), à ignição em leito fluidizado (Bu et al., 2014; Jia et al., 2006; Prins et al., 1989), à ignição em recipientes de armazenamento e transporte (Binkau *et al.*, 2014; Jones, 2000; Zhao *et al.*, 2013), ou então à ignição em leitos florestais (Kim et al., 2006; Manzello et al., 2008) e uma minoria abrange a ignição de um combustível a granel em leito fixo formando um meio poroso, etapa esta que é o início da propagação da frente em leito fixo. Quando há a presença de várias partículas num processo de ignição diversos outros parâmetros estão envolvidos, como densidade, concentração das partículas, distribuição granulométrica, dentre outros (Essenhig *et al.*, 1989).

Os primeiros trabalhos a se concentrarem na ignição em um meio sólido poroso foram os de Ohlemiller (Ohlemiller e Summerfield, 1971; Ohlemiller, 1990; Ohlemiller et al., 1973), onde o autor estudou a ignição e propagação da frente de reação para o campo da segurança contra incêndios. O autor em seus trabalhos estudou a

ignição e combustão em placas isolantes, paredes, móveis em geral, e diversos combustíveis porosos.

Quanto a ignição de um combustível em um reator de leito fixo, alguns dos primeiros trabalhos abrangendo esse assunto foram realizados por Kalthoff e Vortmeyer (1980) seguido do trabalho de Vortmeyer e Stahl (1981), que estudaram o comportamento da ignição e extinção em um reator catalítico de leito fixo onde ocorria oxidação de gás etano. Não se deve confundir esses estudos com a combustão de sólidos em leito fixo, uma vez que o combustível utilizado era gasoso. Porém as técnicas de medição de temperatura para detectar a temperatura de ignição foram semelhantes as utilizadas em reatores de combustível sólido.

Talvez o primeiro trabalho que se concentrou em estudar a ignição e combustão em um reator de leito fixo de combustível sólido foi o de Reinelt et al. (1994). Os autores, utilizando dados bastante conhecidos da ignição superficial de placas de sólidos combustíveis modelaram o comportamento da ignição de um leito poroso de combustível carbonoso e o consequente regime de combustão *smouldering*. Nesse trabalho os autores consideraram apenas as reações heterogêneas durante a ignição do combustível. Posteriormente, os autores conseguiram modelar também as reações homogêneas durante a ignição (Reinelt et al., 1998).

Wildegger-Gaissmaier e Johnston (1996) realizaram um estudo numérico-experimental abrangendo a ignição de um leito fixo composto por propelente para aplicações militares. Uma fonte de ignição era inserida dentro do leito e medidores de pressão foram usados para analisar o evento de ignição e combustão do leito de propelente.

Kooker et al. (1996) observou que existe uma influência da composição no tempo de ignição em um leito fixo formado de propelentes a granel.

Já no campo dos estudos experimentais da ignição de combustíveis sólidos carbonosos em reatores de leito fixo poucos trabalhos são encontrados.

Di Blasi *et al.* (1999) observaram a ignição e combustão de um leito formado de palha. Os autores variaram a temperatura de entrada do ar e observaram que para condições severas de entrada o tempo para iniciar a ignição era menor e temperatura de ignição era maior.

Yang *et al.* (2003) estudaram a combustão e ignição em leito fixo de lascas de madeira e de resíduos sólidos urbanos simulados. Os autores observaram em seu

estudo, dentre os vários resultados encontrados, que a taxa de desvolatilização tem um efeito perceptível sobre o tempo de ignição.

Van Blijderveen *et al.* (2010) estudaram a ignição em leito fixo da madeira, carvão e combustível derivado de resíduos. Os autores encontraram, dentre outras coisas, que tanto a temperatura do ar crítica necessária para a ignição espontânea quanto a temperatura de ignição espontânea aumentam proporcionalmente à velocidade do ar de alimentação. Posteriormente os autores realizaram a modelagem computacional desse fenômeno (Van Blijderveen *et al.*, 2013).

### 2.2.3 Influência da composição do combustível

A análise da influência da composição do combustível no seu comportamento de ignição, além de ser um dos objetivos dessa dissertação, é um tema de grande importância. Mudando-se a composição do combustível, seja por adição de determinadas substâncias ou pela realização de um algum tratamento térmico ou químico, pode-se melhorar a eficiência de combustão em combustores industriais, bem como auxiliar a prevenção de incêndios e controle de chama. Portanto é de grande interesse encontrar os parâmetros na composição do combustível que afetam a ignição do mesmo. Estudos recentes vêm sendo realizados a respeito da influência da composição do combustível, tanto para combustíveis fluidos (Donohoe *et al.*, 2015; Hellier *et al.*, 2015; Sabia *et al.*, 2015) quanto para sólidos (Binkau *et al.*, 2014; Mason *et al.*, 2015; Rianza *et al.*, 2014) no comportamento da ignição dos mesmos. Alguns estudos de interesse são descritos a seguir.

Binkau *et al.* (2014) determinaram a influência da mistura de sais inorgânicos no comportamento de auto-ignição de diferentes tipos de carvão. Durante os ensaios foi observado que se a decomposição do material ocorre depois da temperatura de auto-ignição do combustível puro, um aumento na temperatura de auto-ignição da mistura pode ser observado.

Mason *et al.* (2015) observaram a influência da umidade adicionada a diferentes tipos de biomassa no tempo de ignição, os autores observaram que quanto maior a umidade maior o tempo para o combustível entrar em ignição. Van Blijderveen *et al.* (2012), utilizando madeira e plásticos como combustível sob diferentes fluxos de radiação, e Yang *et al.* (2003) utilizando madeira e resíduos simulados sob diferentes taxas de desvolatilização, encontraram resultados semelhantes.

Harada (2001) chegou a conclusão que a orientação dos grãos do combustível afeta o tempo de ignição do mesmo. Vale ressaltar, porém, que na combustão em leito fixo existe um conglomerado de partículas em diferentes orientações, logo esse efeito não é importante.

Riaza *et al.* (2014) observaram que carvões de classificação mais elevada (de maior teor de CF) sofreram ignição heterogênea na superfície da partícula, ao passo que as partículas de carvão de baixo CF sofreram ignição homogeneamente na fase gasosa. Além disso, as temperaturas de ignição aumentaram com o aumento da classificação do carvão. Isso indica que um aumento na concentração de CF tende a aumentar a temperatura necessária para o combustível entrar em ignição.

Sun e Kozinski (2000) observaram durante a combustão de resíduos de papel e celulose que normalmente a temperatura de ignição diminui com o aumento do teor volátil, o que está de acordo com outros estudos (Essenhight *et al.*, 1989; Sun *et al.*, 1998).

Di Blasi *et al.* (1999), nos seus estudos sobre a ignição e combustão de um leito formado de palha in natura e palha lixiviada pela chuva reportaram que a lixiviação aumentou o volume da palha e reduziu o teor de cinzas em cerca de 50 % em peso, reduzindo especialmente as quantidades de cloro e potássio. Foi também observado que as temperaturas de ignição foram menores para palha sem tratamento, em comparação com palha lixiviado. De acordo com os autores, esse resultado é devido a uma reatividade mais baixa da palha lixiviada por causa da remoção dos componentes cataliticamente ativos para a combustão heterogênea do CF que foram retirados juntamente com cloro. Além disso, sua dilatação modificou as condições de transferência de calor em todo o leito.

Van Blijderveen *et al.* (2010) observaram, utilizando madeira, carvão e resíduos derivados de resíduos, que o aumento da percentagem de inerte na mistura aumentou a temperatura de ignição. Isto ocorre devido ao fato do inerte absorver mais energia sem produzir calor. Para compensar isso e iniciar a ignição é necessária mais energia, por isso, a temperatura de ignição aumenta. Isto também pode ser explicado pelo fato de que adicionando inerte no combustível, o calor produzido pela reação diminui. Além disso os autores observaram que o aumento da vazão de ar aumenta a temperatura necessária para ocorrer a ignição. Isso é provavelmente causado pelo fato de que o aumento da velocidade de fluxo de ar aumenta a perda devido à convecção.

Esses trabalhos servirão de base para interpretação dos resultados encontrados no presente estudo.

### 2.3 PROPAGAÇÃO DA FRENTE DE COMBUSTÃO

Após um leito de combustível entrar em ignição observa-se que, respeitadas algumas condições, a frente de combustão propaga-se até consumir o combustível do leito. A descrição da propagação da frente de combustão em um meio poroso reativo permanece como um desafio para os pesquisadores em termos de físico-química e transferência de calor e massa.

De acordo com Hobbs *et al.* (1993), o primeiro grande esforço no estudo da propagação da frente de combustão data de 1977 e 1979. Desde então, problemas ambientais e a busca de fontes alternativas de energia tem motivado maiores pesquisas sobre o assunto. Estes esforços centraram-se na determinação dos parâmetros que influenciam o progresso e a estrutura de uma frente de combustão. Com esta finalidade, alguns autores têm desenvolvido dispositivos experimentais e modelos numéricos para representar esse fenômeno. Podemos dividir esses estudos em dois arranjos comuns de propagação encontrados nos processos de combustão:

- 1) Combustão contra-corrente, onde a frente de queima e a alimentação de ar movem-se em sentidos opostos no leito de combustível. Esse fornecimento de ar em contra-corrente é normalmente encontrado em processos de incineração de resíduos (Khor *et al.*, 2007; Ryu *et al.*, 2006, 2007; Yang *et al.*, 2005).
- 2) Combustão co-corrente, onde a frente de queima e a alimentação de ar movem-se no mesmo sentido no leito de combustível (Rein *et al.*, 2005; Thunman e Leckner, 2003; Wang *et al.*, 2003). O melhor exemplo de combustão co-corrente pode ser encontrado na combustão in-situ para recuperação de petróleo (Akkutlu e Yortsos, 2003; Castanier e Brigham, 2003).

O presente trabalho foca-se no arranjo co-corrente de propagação. Estudos da propagação da frente de combustão no arranjo co-corrente são escassos e os

existentes são de situações bem variadas. Alguns dos trabalhos desenvolvidos são de interesse no presente trabalho.

Wang et al. (2003) apresentaram um estudo experimental de combustão *smouldering* co-corrente forçada horizontal. Foi mostrado que a propagação da frente e sua temperatura aumentam com a taxa de fluxo de ar.

Thunman e Leckner (2003) investigaram o tempo total da conversão, a posição das zonas de conversão (pirólise, secagem, combustão) no tempo e ao longo do comprimento do reator para os arranjos co-corrente e contracorrente.

Pironi et al. (2009) realizaram experimentos de combustão *smouldering* co-corrente usando uma mistura de carvão em meio inerte como combustível, e obteve-se informações valiosas sobre as propriedades da frente de combustão.

Vantelon et al. (2005) realizaram um estudo experimental sobre a combustão co-corrente de um leito de pneus e briquetes refratários. Foi descoberto que o processo de combustão é influenciado pela taxa de fluxo de ar através do reator. Uma reação de combustão com oxigênio limitado move-se de um regime de elevada produção de óleo residual e baixas velocidades de propagação a um regime de baixa produção de óleo e uma conversão muito mais rápida.

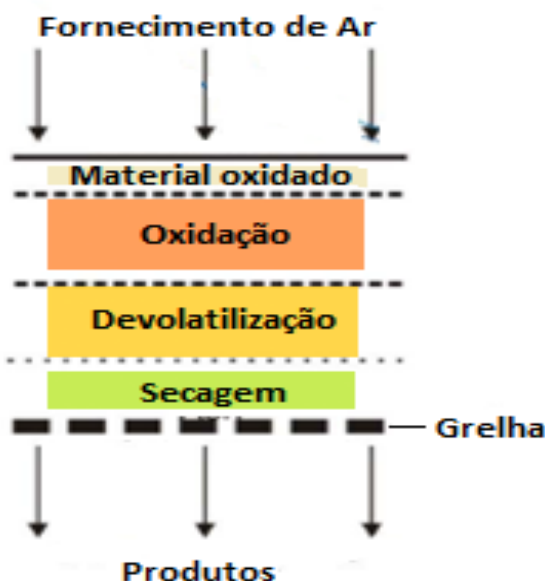
Martins et al. (2010) realizaram experimentos co-corrente. Alguns desses foram realizados utilizando uma mistura de carvão em meio inerte (areia) e, após isso, uma série de outros foram realizados com o xisto betuminoso. Dados a respeito da estrutura da frente, temperatura e pressão do leito foram encontrados.

Monhol e Martins (2015) realizaram experimentos utilizando uma mistura de polietileno e carvão no arranjo co-corrente e obtiveram informações importantes sobre a velocidade da frente, distribuição de temperaturas no tempo e produtos gasosos gerados no processo.

### 2.3.1 Fenômenos que ocorrem durante a propagação da frente

Durante a propagação de uma frente de combustão num meio poroso composto por combustíveis carbonosos geralmente, de um ponto de vista simplificado, é possível distinguir três zonas globais, conforme indicado na **Figura 7**.

Cada zona é caracterizada por uma importante etapa no processo de conversão do combustível. Os processos nas três zonas são comentados adiante:



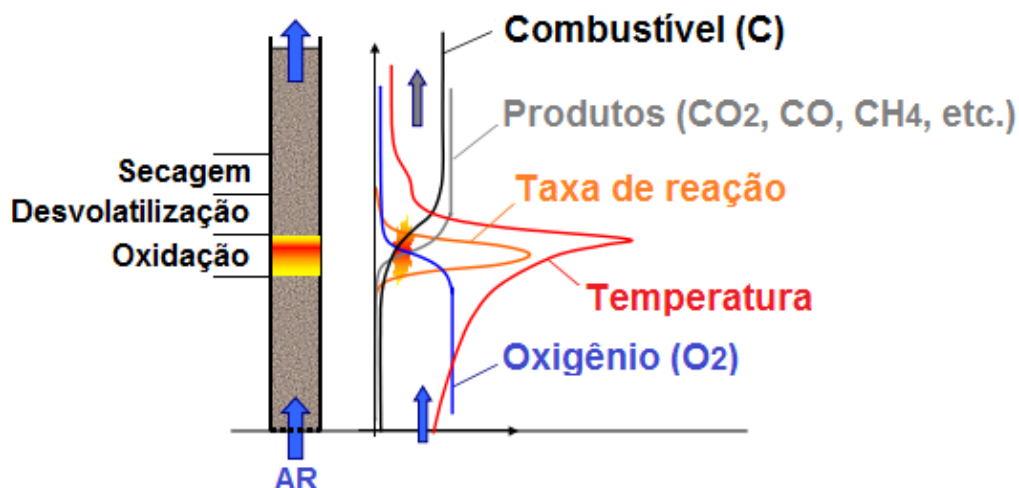
**Figura 7 - Zonas de reação**

- Zona de secagem: Como resultado da transferência de calor a partir das regiões de alta temperatura do leito, a secagem do combustível sólido ocorre.
- Zona de pirólise ou desvolatilização: em temperaturas superiores a 250 °C, começa a pirólise do combustível sólido. As moléculas grandes decompõem-se em moléculas de tamanho médio e CF.
- Zona de oxidação: uma zona de queima (oxidação) é formada no nível onde o oxigênio (ar) é introduzido. Reações com oxigênio são altamente exotérmicas e resultam em um aumento acentuado de temperatura (1200 – 1500 °C).

Essa é uma abordagem simplificada, tendo em vista que uma série de outras reações além da oxidação, em ordem nem sempre definida, ocorre em uma frente de combustão a depender do combustível e de vários outros fatores. Assim, é mais apropriado definir uma zona de reação ao invés de uma zona de oxidação. A **Figura 8** mostra as regiões presentes em um leito de combustível (baseado em carbono com alguma umidade) ao se propagar uma frente de combustão. Pode-se observar claramente a região onde as reações são mais intensas, bem como a variação da temperatura e dos níveis de  $O_2$ ,  $CO_2$  e Carbono.

Diversos estudos sobre o comportamento e as dimensões dessas zonas existentes durante a propagação de uma frente têm sido realizados. A seguir alguns desses estudos são apresentados.





**Figura 8** - Zonas de Reações em uma frente de propagação da combustão, adaptado (Martins, 2008).

Fatehi e Kaviany (1994) determinaram a espessura da frente como o comprimento do meio através do qual a velocidade da reação era igual ou maior do que  $1/10$  do seu valor máximo. De acordo com os autores, a espessura da frente aumenta linearmente com a velocidade do ar dos poros.

Yang *et al.* (2003) no seu trabalho utilizando resíduos sólidos urbanos e lascas de madeira, definiram a espessura da zona de reação como a distância física posterior à chama onde a temperatura do leito aumenta de  $30^{\circ}\text{C}$  para o seu valor de pico. Nos ensaios a espessura da zona de reação variou de 20 - 50 mm. Observou-se que esta espessura é uma função inversamente linear do teor de umidade.

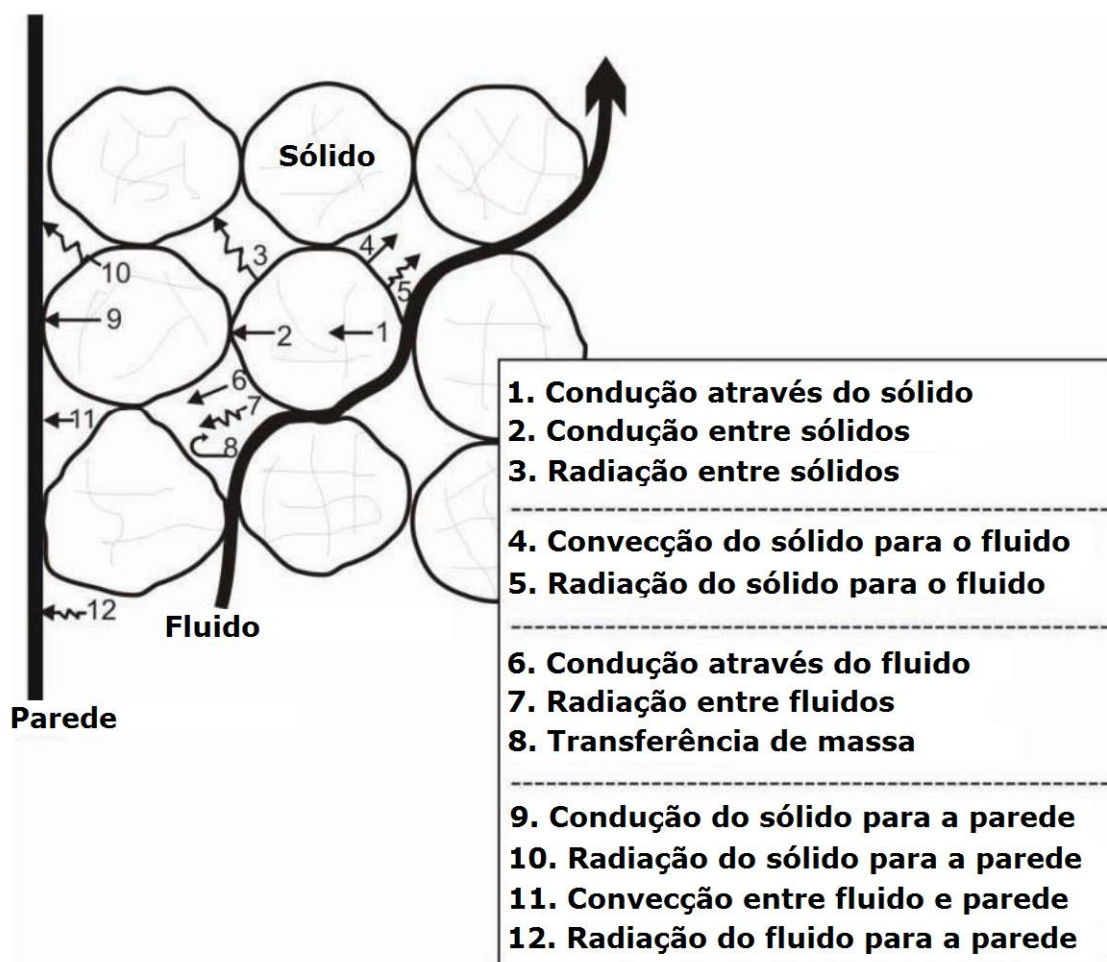
Através das zonas de secagem e de desvolatilização, Yang *et al.* (2005) obtiveram a taxa de evaporação da umidade no interior do leito em função do tempo para o diâmetro de partícula entre 10 - 35 mm. Para partículas de 10 mm, a zona de secagem situava-se cerca de 50 mm abaixo da parte superior do leito e estendia-se até 70 mm. A zona de desvolatilização afastava-se do topo do leito a medida que a frente se desenvolvia e atingiu um máximo de 40 mm abaixo do topo.

Debenest *et al.* (2005) realizaram experimentos com xisto betuminoso onde a frente de reação se propagava para cima. Eles observaram visualmente o progresso da frente, com uma camada de incandescência de três vezes o diâmetro de partícula de combustível.

Já em relação aos processos de transferência de calor e massa presentes numa frente de combustão em meio poroso, Hobbs *et al.* (1993) fizeram uma breve

descrição qualitativa dos processos físicos e químicos que ocorrem durante a combustão em leito fixo.

A descrição da interação de transferência de calor e massa entre as fases gasosa e sólida, e entre as partículas são descritas na **Figura 9**.



**Figura 9** – Interação entre as fases, adaptado (Martins, 2008).

### 2.3.2 Combustão *smouldering* versus combustão *flaming*.

Geralmente é um desafio estabelecer o que realmente está sendo oxidado durante a propagação de uma frente de combustão: o sólido após desvolatilização ou também parte da matéria volátil.

Existem processos onde a frente de combustão é propagada em um meio poroso reativo sob comportamento *smouldering*. É uma reação auto-sustentável em que o calor liberado pela oxidação direta da superfície do combustível sólido (reação

heterogênea) causa a pirólise do combustível adjacente não afetado pela zona de reação.

De acordo com Ohlemiller (2002), *smouldering* é uma forma de combustão sem chama, derivando seu calor de reações heterogêneas que ocorrem na superfície de um combustível sólido, quando aquecido num ambiente oxidante. Esse fenômeno é de interesse tanto como um problema fundamental de combustão como para prevenções de incêndios. Exemplos comuns de combustão *smouldering* são: incêndios imobiliários de início imperceptível por pequenas fontes de calor e a combustão que ocorre durante o consumo de um cigarro. Além disso, *smouldering* de jazidas de carvão e resíduos de carvão são reconhecidas por causar problemas ambientais e econômicos de extensão global, representando um dos mais desafiadores riscos para as indústrias de carvão de todo o mundo (**Figura 10**).



**Figura 10** - Colapso de uma *smouldering* durante extração em uma mina de carvão, Northern China (Rein, 2005).

Segundo Rein (2005), a diferença fundamental entre a combustão *flaming* e a combustão *smouldering* é que na combustão *smouldering*, a oxidação das espécies reagentes ocorre na superfície do sólido, em vez de na fase gasosa como ocorre na chama. A temperatura característica e o calor liberado durante a combustão *smouldering* de um sólido são relativamente baixos em comparação com aqueles da combustão *flaming*. Estas características fazem a combustão *smouldering* se

propagar a baixas velocidades, tipicamente cerca de 0,1 mm/s, o que é cerca de duas ordens de grandeza menor do que a velocidade de propagação da combustão *flaming* ao longo de um sólido. Uma vez que a ignição ocorre, a reação de combustão *smouldering* se propaga através do material de uma forma lenta.

Ohlemiller (1985) relatou que a oxidação do CF é a fonte de calor principal da maioria dos processos de propagação de combustão *smouldering* auto sustentadas. O potencial de combustão *smouldering* existe, assim, com qualquer material que forme uma quantidade significativa de carvão (CF) durante a decomposição térmica. Tem sido observado que, para a maioria dos materiais e condições típicas, os dois fatores limitantes em combustão *smouldering* são o fluxo de meio oxidante e as perdas de calor a partir da zona de reação. Apesar de suas características de pequenas energias liberadas, *smouldering* é um perigo significativo pois pode ser iniciada por pequenas fontes de calor; produz altos teores de produtos tóxicos por unidade de massa oxidada (particularmente CO e moléculas pesadas); é difícil de detectar e extinguir; e pode de repente fazer a transição para a combustão *flaming*.

A transição da combustão *smouldering* para a *flaming* é uma ignição espontânea em fase gasosa (reação homogênea) induzida pela reação *smouldering* que atua tanto como fonte de combustível gasoso (pirolisados, CO, etc.) como fonte de calor para iniciar a reação homogênea. Esta situação quando persistida caracteriza a chamada combustão *flaming*.

Ohlemiller (2002) relatou que, dependendo do material, a transição de *smouldering* para *flaming* no leito ocorre a velocidades de fluxo de ar acima de cerca de 0,9 - 1,7 m s<sup>-1</sup>. Para os materiais estudados pelo autor, *flaming* não se desenvolve quando o tamanho médio de partícula foi inferior a 1 mm.

De acordo com Bar-Ilan *et al.* (2005), a transição é mais provável de ocorrer quando o calor liberado pelas reações é maior do que as perdas de calor para o ambiente circundante. Os autores apresentaram uma experiência onde a transição de combustão *smouldering* para *flaming* foi observada a medida que se reduzia as perdas de calor para o ambiente e aumentava-se a concentração de oxigênio. A transição ocorre, eventualmente, se forem satisfeitas condições críticas no interior dos poros do sólido, provocando o aparecimento de reações em fase gasosa. As condições críticas incluem a inflamabilidade da mistura de gases no interior dos poros e um excesso de calor liberado pelas reações de oxidação da fase sólida. Assim, a transição da combustão *smouldering* para *flaming* oferece um alto grau de

risco de incêndios, que poderiam ser iniciadas com fontes de calor que são muito fracas para acender uma chama diretamente sobre um dado combustível sólido.

## 2.4 REGIMES DE COMBUSTÃO

Alguns estudos têm se concentrado em determinar o comportamento da propagação da frente de combustão dependendo de alguns parâmetros envolvidos no processo. Assim, foram definidos regimes de combustão para caracterizar a propagação da frente.

Em relação a propagação da frente de reação e a frente de transferência de calor, foram identificados na literatura três tipos de estruturas (Aldushin, 1990; Aldushin, 1993; Schult, 1995). Essas estruturas da frente de propagação dependem das capacidades térmicas do combustível e do gás e das suas concentrações antes e depois das zonas de reação no leito. Esses parâmetros são representados por um termo  $\Delta$  que, de acordo com Debenest *et al.* (2005) pode ser aproximado pela equação abaixo:

$$\Delta = \frac{C_g ([C]_{antes} - [C]_{depois})}{C_c ([O_2]_{antes} - [O_2]_{depois})} \quad (2.1)$$

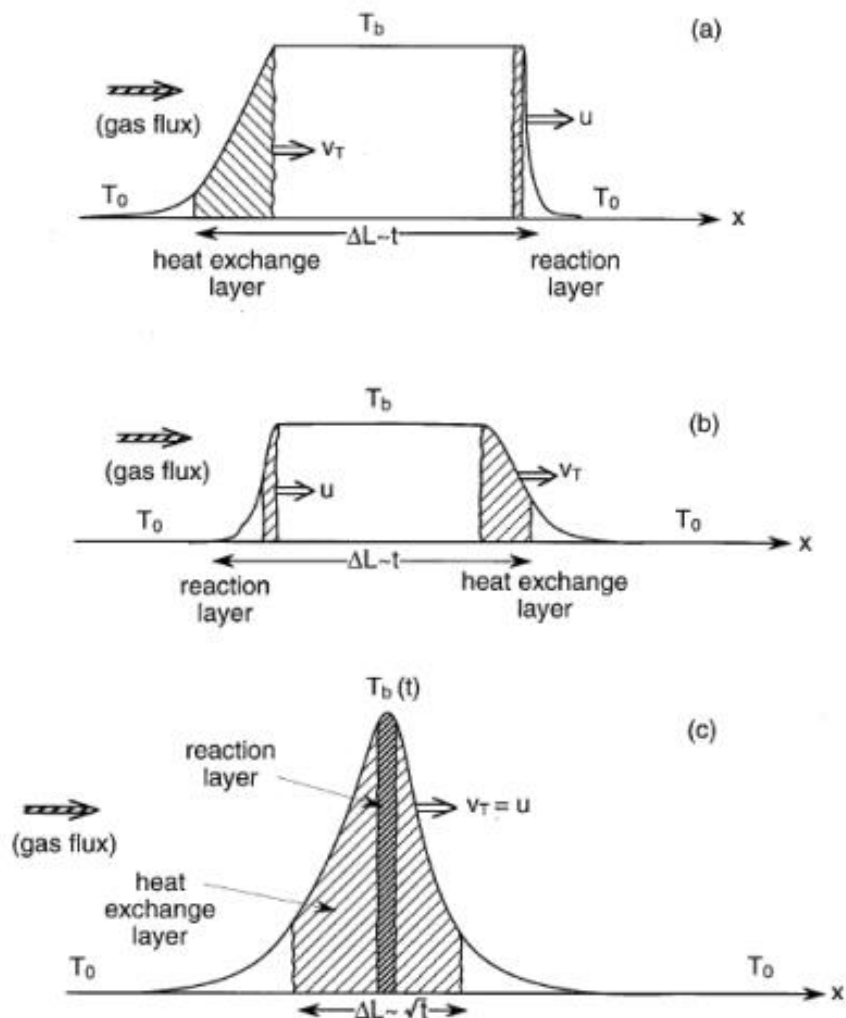
Onde:

$C_g$  e  $C_c$  são as capacidades térmicas do gás e do combustível respectivamente;  
 $[C]$  e  $[O_2]$  são as concentrações para o combustível e o oxigênio respectivamente.

Aldushin *et al.* (1999) apresentaram um esquema para ilustrar as três estruturas de propagação, conforme mostrado na **Figura 11**.

Para o primeiro caso, se  $\Delta < 1$ , a zona de reação precede a zona de transferência de calor, na qual o sólido cede calor ao fluxo de gás frio que escoar em equilíbrio térmico com o sólido. Uma vez que os processos ocorrem em duas zonas independentes, cada um possui a sua própria velocidade de propagação. Neste tipo de estrutura a zona de reação progride mais rapidamente e, portanto, em frente da zona de transferência de calor; este tipo de estrutura é chamada na literatura de **reaction leading**. Nesse regime a maior parte do calor produzido é deixado para

trás da zona de reação, onde a temperatura atinge um pico de  $T_b$  acima da temperatura da região mais a jusante. Para a estrutura denominada **reaction trailing**, se  $\Delta > 1$ , a zona de reação é posterior à zona de transferência de calor. Nesse regime a maior parte do calor produzido na zona de reação é transportado por convecção para o lado a jusante, onde a temperatura atinge um platô a  $T_b$  acima da temperatura ambiente que prevalece no lado mais a montante. O caso para  $\Delta = 1$  separa as duas estruturas e corresponde a uma temperatura de pico infinito, ou seja, soluções para a propagação da frente de combustão já não são possíveis. No entanto, esta situação corresponde a condições em que o efeito super-adiabático se manifesta mais fortemente.

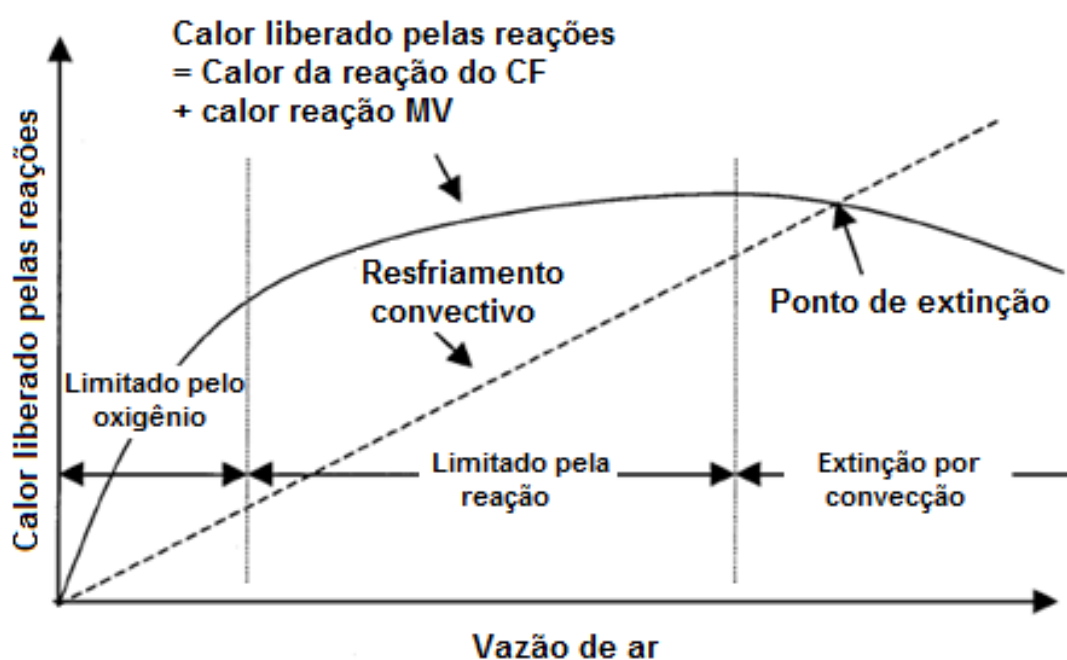


**Figura 11** - Frente de combustão co-corrente: a)  $\Delta < 1$ , Estrutura *reaction leading*; b)  $\Delta > 1$ , Estrutura *reaction trailing*; c)  $\Delta = 1$ , frente com acumulação de energia máxima (Aldushin et al., 1999).

Já em relação a disponibilidade de oxigênio, Shin e Choi (2000) propuseram um conceito para a propagação em contra-corrente de uma frente de combustão que pode ser útil também ao regime co-corrente. A combustão de combustível sólido em um leito fixo foi investigada usando experimentos unidimensionais. Os efeitos da taxa de fornecimento de ar, o tamanho das partículas e poder calorífico do combustível são discutidos em seu estudo. Dois regimes de combustão em leito fixo puderam ser distinguidos, com base na disponibilidade de oxigênio.

**Combustão limitada pelo oxigênio:** Em baixas taxas de fornecimento de ar o oxigênio é completamente consumido pelo carvão produzido e pela reação do material volátil. Neste caso, a taxa de reação do combustível é determinada pela taxa de fornecimento de oxigênio.

**Combustão limitada pela reação:** Se a taxa de fornecimento de ar aumenta, a taxa de reação é aumentada, mas devido à existência do limite da taxa de reação do material no interior do leito, ocorre um aumento da concentração de oxigênio na saída. Neste caso, a taxa de reação não pode aumentar mais devido à taxa limite de reação, e portanto, pode-se observar o arrefecimento do leito pela convecção do ar. Uma representação esquemática, mostrada na **Figura 12**, mostra como a combustão depende da taxa de fornecimento de ar.



**Figura 12** – Efeito da taxa de fornecimento de ar na combustão em leito fixo, adaptado (Shin e Choi, 2000).

## 2.5 RETRAÇÃO DO LEITO DE COMBUSTÍVEL

Durante um processo de conversão térmica de determinado combustível sólido, à medida que esse vai sendo aquecido há um fenômeno de perda de massa e volume devido aos processos de secagem, pirólise ou combustão desse material. Alguns estudos têm se concentrado em quantificar a retração sofrida pelo sólido devido à perda de volume causada pelo processo térmico ao qual o material foi submetido (Kumar *et al.*, 2006; Papadikis *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2014). Particularmente, esses autores observaram a retração no volume devido ao processo de pirólise em corpos de materiais carbonosos.

Em relação ao processo de retração do combustível que ocorre no processo de combustão em um leito de combustível (processo esse que abrange também os fenômenos de secagem e pirólise além da combustão do sólido) poucos trabalhos foram realizados até o presente momento. Esse assunto é de extrema importância em diversas aplicações como, por exemplo, a combustão em fornos de grelha móveis. Nesse tipo de forno o ar flui de baixo da grelha para cima e a grelha é abastecida de um lado e caminha para o outro de forma que o leito de combustível deve ser consumido até o momento que alcança a outra extremidade da grelha e as cinzas são despejadas. Para o processo dar certo é necessário que a retração (ou consumo) total do leito seja calculada e coincida com o momento em que o combustível alcança a parte final da grelha. Como os fenômenos ocorrendo no sentido do fluxo de ar são mais importantes do que os fenômenos existentes devido ao movimento da grelha, modela-se essa situação utilizando a combustão em leito fixo (Shin e Choi, 2000). Porém, poucos trabalhos sobre combustão em leito fixo abordam esse tema tão importante.

A maioria dos trabalhos realizados sobre esse aspecto da propagação da frente centra-se em modelos numéricos que sejam capazes de prever esse fenômeno, e ainda assim tratam desse assunto de modo secundário e indireto sendo em alguns casos até não intencionais (Thunman e Leckner, 2003; Yang *et al.*, 2004). Já no campo dos trabalhos empíricos sobre esse assunto o número de estudos existentes é ainda menor.



Encontrou-se apenas um trabalho, a saber o de Martins *et al.* (2010), que quantificou empiricamente esse fenômeno para o arranjo co-corrente de propagação e ainda assim de modo bem superficial. Os autores obtiveram a retração do leito sofrido durante o processo de combustão co-corrente do xisto betuminoso e de uma mistura de areia e carvão. Segundo os autores o xisto betuminoso apresentou uma retração de 3,5 % após o processo, sendo essa característica fundamental para a escolha desse combustível em seu trabalho. Já para a mistura de areia e carvão a retração após o processo de combustão foi de 16%. Os autores obtiveram esses valores através de medidas diretas observando o volume de combustível que permaneceu no reator após findado o processo. Segundo os autores a retração do leito influencia a propagação da frente uma vez que a distribuição do fluxo de ar não permanecerá uniforme devido a irregularidades superficiais provocadas pela retração do sólido.

Para o arranjo contra-corrente de propagação alguns autores têm buscado diferentes formas de quantificar esse fenômeno empiricamente e como ele afeta a propagação da frente de combustão.

Hermansson e Thunman (2011) realizaram um estudo numérico experimental onde, através de vídeo monitoramento, a posição de uma única partícula no topo do leito foi rastreada durante a propagação contra-corrente da frente em pellets de madeira. Observou-se que a retração do leito foi devido à retração individual de cada uma das partículas e devido aos colapsos repentinos do leito. No experimento observou-se uma retração total do leito de 4 cm. A maior parte do encolhimento na direção horizontal resultou em um aumento da porosidade que atrasou o encolhimento vertical do leito. Segundo os autores, a retração do leito é dependente do combustível.

Gómez *et al.* (2014) realizaram um estudo numérico experimental onde foi utilizado um dispositivo para medir a altura do leito a medida que a frente se propagava no sentido contra-corrente. O aparato experimental para realizar a medida da altura do leito, devido a sua dimensão, parece ter influído bastante nos resultados experimentais. Os autores observaram a influência do fluxo de ar na velocidade de retração do leito e obtiveram que um aumento no fluxo de ar acelera a retração do leito.

Shin e Choi (2000) obtiveram a altura do leito no decorrer do tempo para a combustão contra-corrente de resíduos sólidos simulados em leito fixo. Os autores

utilizaram medidas de temperaturas nos termopares para identificar a posição da frente e a altura do leito. Nesse trabalho não foi analisada a influência de algum parâmetro sobre a retração do leito, os resultados foram utilizados apenas para testar a qualidade do modelo numérico adotado.

Assim, métodos experimentais para identificar o comportamento da retração do leito, e os parâmetros que influenciam esse processo, durante a propagação da frente em sentido co-corrente sem influenciar nos resultados obtidos são um campo em aberto na ciência da combustão em meio poroso.

## 2.6 INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA IMPOSTA PELA FONTE DE IGNIÇÃO NA PROPAGAÇÃO DA FRENTE

A fonte de ignição da propagação da frente de combustão pode gerar certa influência no comportamento da frente. Esse ramo de estudo na propagação da frente de combustão é um campo em aberto a ser explorado. É de grande interesse por exemplo em áreas como a proteção contra incêndios (Cleary et al., 1994; Ohlemiller et al., 1998), na área da combustão in-situ (Akkutlu e Yortsos, 2003), e na área de tratamento de solos contaminados (Hasan et al., 2015), pois com um determinado conhecimento ou controle da fonte de ignição pode-se prever e controlar o comportamento futuro da frente de propagação, como por exemplo, por qual caminho ela se propagará. Há alguns trabalhos que abordam a influência da fonte de ignição na propagação de uma frente de chama incendiária em ambientes domiciliares (Cleary et al., 1994; Ohlemiller et al., 1998). Porém, até o presente momento nenhum estudo abordou diretamente a influência da fonte de ignição no comportamento da propagação de uma frente em um leito de combustível sólido. Alguns trabalhos citam que a fonte de ignição exerce influência no comportamento da frente em um reator de leito fixo, porém não a quantificam ou qualificam (Martins *et al.*, 2010).

É de interesse saber se a informação inicial imposta no leito de combustível pela fonte de ignição (distribuição de temperatura criada pelo ignitor) pode ser mantida durante a propagação da frente de combustão. Porém, é um desafio medir a

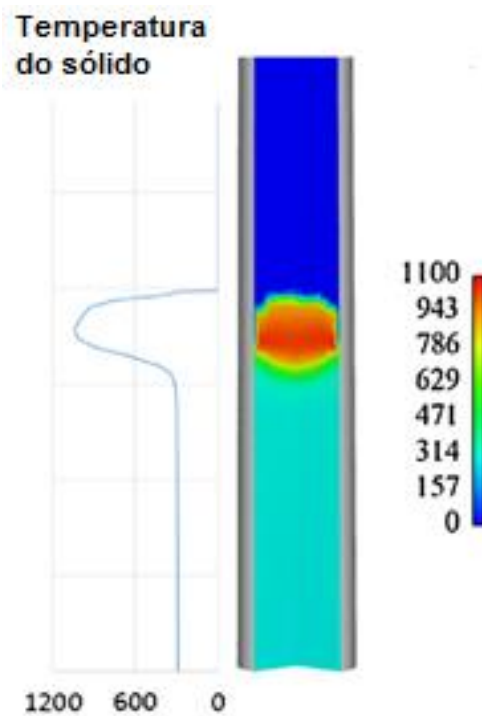
distribuição de temperatura numa seção transversal da frente de propagação para observar se as características da ignição permanecem. Alguns autores têm encontrado a partir de métodos numéricos a distribuição bidimensional de temperatura ao longo do comprimento do leito de combustível (Debenest et al., 2005; Ghabi et al., 2005; Gómez et al., 2014). Porém, em relação a distribuição de temperatura numa seção transversal da frente de combustão não foram encontrados trabalhos divulgados até o presente momento.

Segundo o trabalho de Martins *et al.* (2010), a geometria da frente de combustão depende do fluxo de calor não uniforme durante a ignição, porém essa informação não foi conclusiva. No seu trabalho, a frente de combustão não propagou como uma superfície horizontal. Os autores sugeriram que a inclinação observada na frente de combustão foi devido às instabilidades durante a ignição.

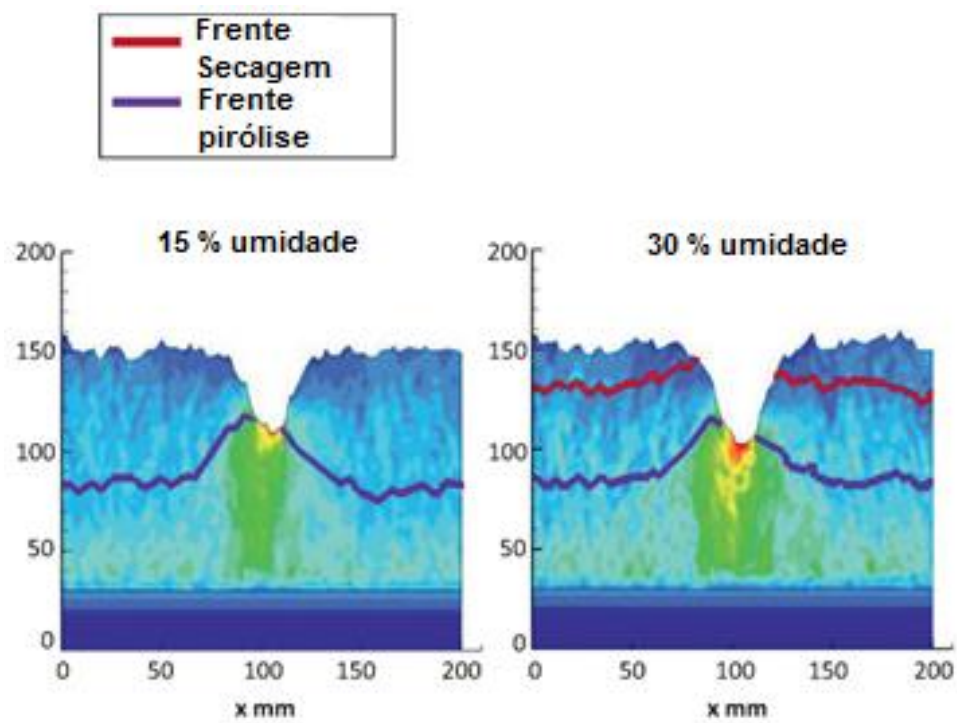
Para verificar se a geometria da frente de combustão depende do fluxo de calor imposto pela fonte de ignição, é necessário desenvolver um método de medição que detecte a geometria da frente em propagação. Diversos trabalhos já foram publicados a respeito da estrutura geométrica de um chama (Houim e Oran, 2015; Wang et al., 2015; Zhou et al., 2015), porém esses trabalhos abordam combustão de combustíveis fluidos ou então de nuvens de combustíveis sólidos dispersos no ar. Já no campo da propagação de uma chama em leito fixo existem poucos trabalhos e a maioria deles são trabalhos numéricos, onde a geometria da frente acabou sendo visualizada nos resultados de modo não intencional. Por exemplo, no trabalho de Gómez *et al.* (2014) foi possível observar uma geometria bidimensional da frente de propagação graças à distribuição de temperatura ao longo do leito obtida através de simulação computacional, conforme mostra a **Figura 13**.

No trabalho de Duffy e Eaton (2013) foi possível observar, nos resultados obtidos através de simulação numérica, a geometria da frente de pirólise e secagem em função de diferentes umidades do combustível, **Figura 14**. Os autores definiram o início da zona de pirólise como sendo a região onde a fração de combustível pirolisado alcança 10%.

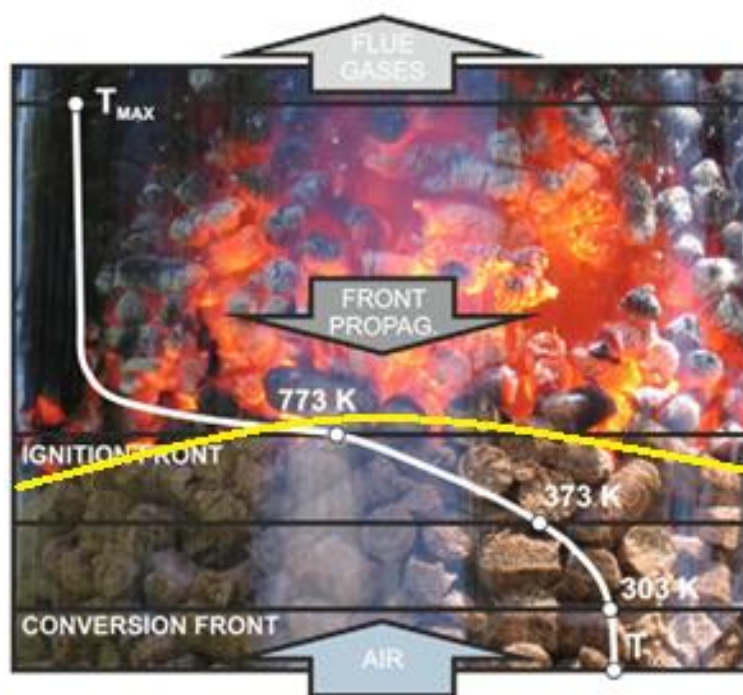
Alguns trabalhos empíricos, como o de Porteiro *et al.* (2012), puderam registrar visualmente, de forma até involuntária, a propagação da frente de combustão em meio poroso. A **Figura 15** mostra uma foto de uma frente em propagação. Observa-se um comportamento semelhante ao mostrado nas figuras acima, onde a frente se propaga mais rapidamente nas proximidades da parede do leito.



**Figura 13** – Distribuição de temperatura no sólido em um leito de combustível, obtida por simulação, adaptado (Gómez et al., 2014).



**Figura 14** – Efeito do teor inicial de umidade no combustível na distribuição da velocidade de fluxo, adaptado (Duffy e Eaton, 2013).



**Figura 15** – Foto ilustrativa de uma frente de combustão em propagação, adaptado (Porteiro *et al.*, 2012).

Há trabalhos onde pôde-se visualizar a geometria percorrida pela frente de chama em tratamentos de solos contaminados. Porém os trabalhos não se concentram em verificar a geometria da frente em si nem em encontrar a influência da fonte de ignição nessa geometria (Hasan *et al.*, 2015). Nesses trabalhos é de extrema importância o controle da geometria percorrida pela frente para se ter uma melhor abrangência da descontaminação do solo pela frente de combustão.

O único trabalho empírico encontrado que aborda o tema diretamente é o de Martins *et al.* (2010). Os autores encontraram a geometria da frente de combustão propagando-se em um leito de xisto betuminoso. Obteve-se a geometria 2-D mostrada na **Figura 16**.

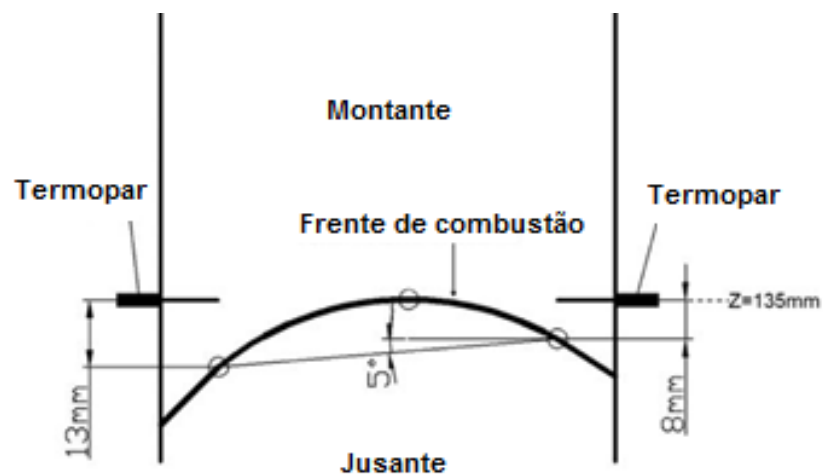
Para obter tal resultado os autores utilizaram medidas de temperatura da frente e juntamente com a velocidade da frente obtiveram a sua posição no leito.

Segundo os autores, uma explicação para essa geometria é que o progresso da frente provavelmente seja controlado pelo fornecimento de  $O_2$ . O fluxo de massa de  $O_2$  perto das paredes frias é mais elevada do que no centro. Há várias razões para isso:

- A densidade de  $O_2$  é maior, devido à temperatura mais baixa;
- A viscosidade é menor, também devido à temperatura mais baixa;
- O arranjo de partículas em contato com as paredes não é tão denso como no resto da célula.

Isso pode explicar o progresso mais rápido da frente nas paredes da célula de combustão.

Assim resta saber se a fonte de ignição pode realmente influenciar no comportamento da frente tanto em relação a sua distribuição de temperatura como em relação a sua geometria e quais parâmetros podem afetar essa influência. Os resultados encontrados até o presente momento são pouco conclusivos.



**Figura 16** – Formato da frente propagando-se em um leito de xisto betuminoso, adaptado (Martins *et al.*, 2010).

## Capítulo 3

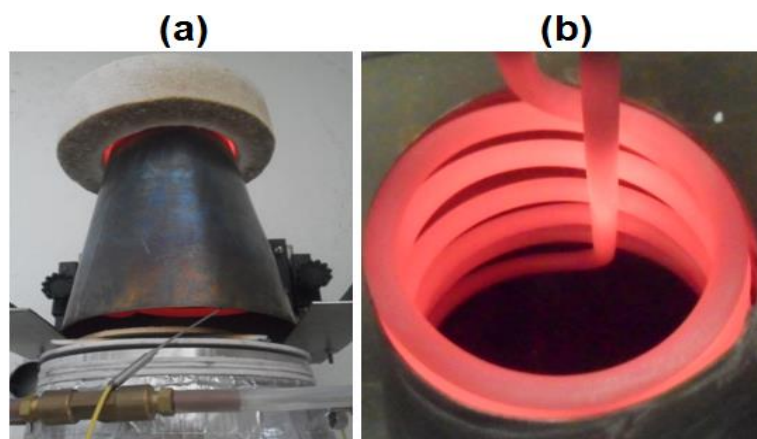
### MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo está subdividido em três seções. A primeira apresenta os vários equipamentos utilizados em conjunto para obtenção dos objetivos dessa dissertação. Alguns desses equipamentos foram até mesmo construídos e calibrados. Na segunda seção mostra-se a preparação do combustível de tal modo que fosse o mais representativo possível e facilitasse a observação da influência de sua composição nas características da frente. A terceira seção apresenta o planejamento experimental que tornou possível a realização dos ensaios de uma maneira mais abrangente e precisa.

#### 3.1 DISPOSITIVOS EXPERIMENTAIS

##### 3.1.1 Dispositivo de ignição

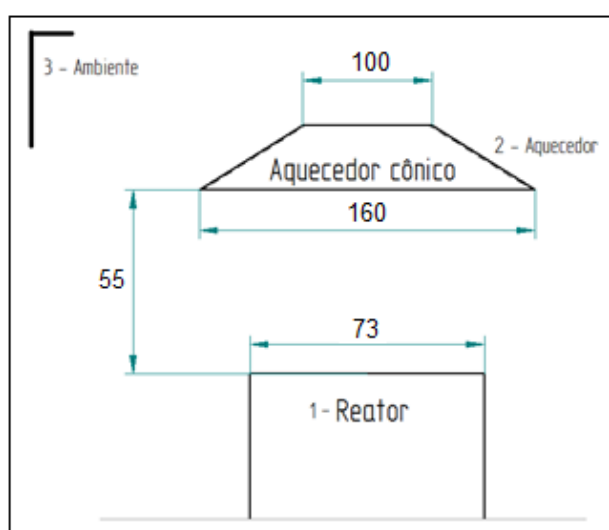
A ignição de um material pode ser realizada de variadas maneiras, e esse trabalho foca-se na ignição através de um dispositivo radiante (Harada, 2001; Park e Tien, 1990; Van Blijderveen *et al.*, 2012; Zhou *et al.*, 2010) devido ao fato desse método ser o que garante a menor desuniformidade na ignição do combustível (Martins *et al.*, 2010). Para iniciar a combustão por intermédio de um perfil uniforme radiante, um dispositivo de ignição chamado Aquecedor Cônico foi utilizado, **Figura 17**. O aparelho é constituído por duas resistências elétricas em forma espiral cônica circundadas por uma placa de aço. O fluxo de calor imposto pelo equipamento pode ser ajustado ligando apenas uma ou as duas resistências ou então mudando-se a distância entre o cone e o reator. No momento da ignição a temperatura do cone é ajustada num dado valor de temperatura para impor um fluxo de calor uniforme sobre o topo da superfície do combustível sólido.



**Figura 17** – Dispositivo de ignição. (a) Aquecedor Cônico. (b) Resistência elétrica do aquecedor.

O fluxo de radiação atravessa uma janela de quartzo que garante a vedação da célula de combustão. Devido às limitações mecânicas e térmicas sobre a parte superior da célula (flange de aço, juntas isolantes e manta térmica), foi necessário utilizar uma distância entre o cone e a superfície da amostra de 55 mm.

As medidas do reator são mostradas na **Figura 18** assim como as superfícies de troca de calor. No aquecedor, há também uma manta isolante que é retirada a partir de um tempo suficiente para que o cone atinja o regime permanente.



**Figura 18** – Esquema com cotas do aparato além das superfícies de troca enumeradas (1-Reator, 2-Aquecedor e 3-Ambiente), medidas em mm.

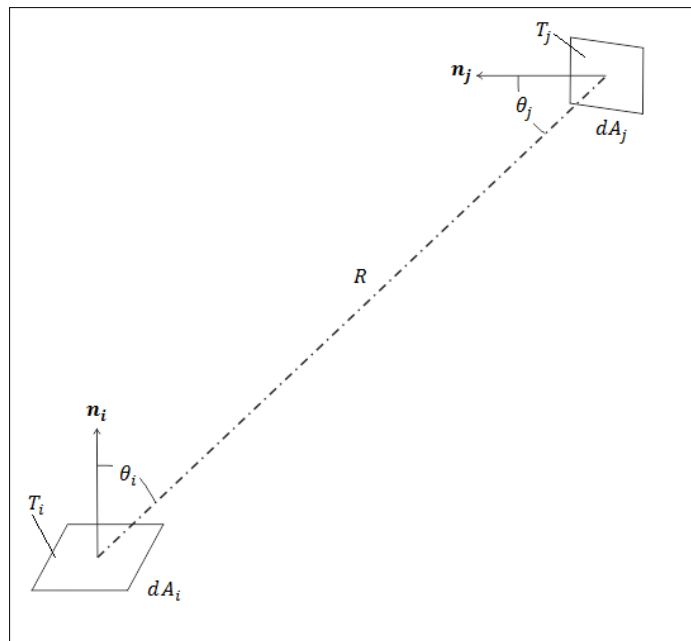


### 3.1.1.1 Fluxo radiante líquido

Para a determinação do fluxo radiante líquido no processo de ignição foi utilizado o conceito de transferência de calor por radiação entre superfícies, levando-se em conta suas geometrias, o Fator de Forma.

O fator de forma  $F_{ij}$  é definido como a fração da radiação que deixa a superfície  $i$  e é interceptada pela superfície  $j$  e é definido pela integral dupla referente às superfícies (**Figura 19**) envolvidas no processo, conforme Equação 3.1.

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (3.1)$$



**Figura 19** - Fator de forma associado a troca de calor por radiação entre os elementos infinitesimais de área  $dA_i$  e  $dA_j$ .

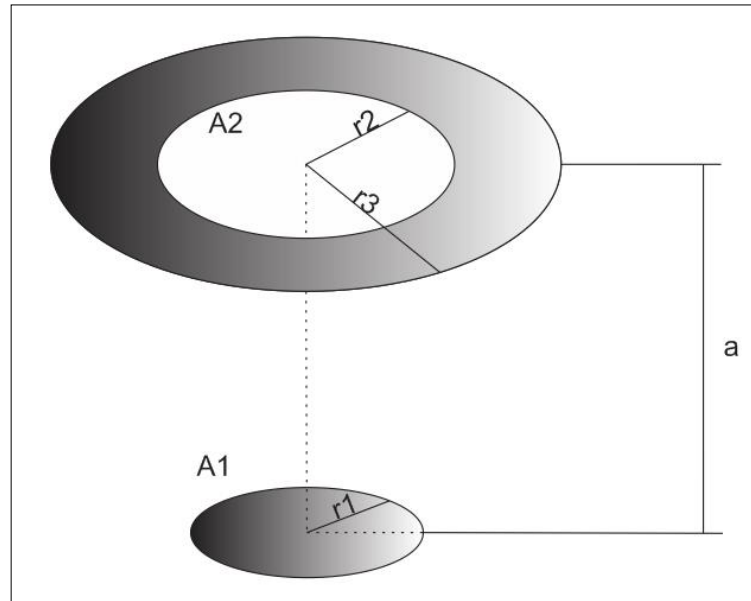
Tem-se as seguintes relações entre fatores de forma, indicadas nas Equações 3.2 e 3.3 :

$$F_{ij}A_i = F_{ji}A_j \quad (3.2)$$

$$\sum_{j=1}^n F_{ij} = 1 \quad (3.3)$$

Os fatores de forma de várias geometrias são tabelados. Para a geometria do aquecedor cônico e do leito usou-se uma aproximação de um círculo e um anel

circular conforme a **Figura 20**. Para essa geometria o fator de forma calculado é descrito pela Equação 3.4.



**Figura 20** - Esquema do fator de forma usado para simular a radiação do cone de aquecimento.

$$F_{12} = \frac{1}{2} \left\{ R_3^2 - R_2^2 - \left[ (1 + R_3^2 + H^2)^2 - 4R_3^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \left[ (1 + R_2^2 + H^2)^2 - 4R_2^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (3.4)$$

Em que:  $H = a / r_1$  ;  $R_2 = r_2 / r_1$  ;  $R_3 = r_3 / r_1$

Como o objetivo é saber o fator de forma da superfície 2 (aquecedor) para a superfície 1 (leito de combustível), utiliza-se a relação entre fatores de forma da Equação 3.5.

$$F_{21} = \frac{A_1 F_{12}}{A_2} \quad (3.5)$$

A partir da Equação 3.3 para as três superfícies, onde  $F_{11} = F_{22} = 0$ , obtém-se as Equações 3.6 e 3.7.

$$F_{13} = 1 - F_{12} \quad (3.6)$$

$$F_{23} = 1 - F_{21} \quad (3.7)$$

A troca líquida de radiação em uma superfície é definida pela diferença entre a radiosidade (J) de uma superfície e sua irradiação (G), e pode ser escrita conforme a Equação 3.8.

$$q_i = A_i(J_i - G_i) \quad (3.8)$$

Em que:  $J_i = E_i + \rho_i G_i$

Considerando uma superfície cinza, ou seja, que possui uma emissividade diferente da unidade, reescreve-se a radiosidade na forma das Equações 3.9 e 3.10:

$$J_i = \varepsilon_i E_{cni} + (1 - \varepsilon_i) G_i \quad (3.9)$$

$$\rho_i = 1 - \varepsilon_i \quad (3.10)$$

Substituindo as Equações 3.9 e 3.10 na 3.8 obtém-se a Equação 3.11:

$$q_i = \frac{E_{cni} - J_i}{(1 - \varepsilon_i) / \varepsilon_i A_i} \quad (3.11)$$

Percebe-se que para  $\varepsilon_i = 1$  e  $A_i \rightarrow \infty$ , o termo no denominador, que é uma resistência radiante superficial, é anulado e comporta-se como um corpo negro. Conclui-se, portanto, que pode-se considerar um corpo muito grande como um corpo negro. Essa consideração foi utilizada na definição da emissividade do ambiente (superfície 3) que possui área muito maior que as superfícies 1 e 2. Para quantificar a troca líquida entre uma superfície e outra, que é definida pela taxa total na qual a radiação atinge a superfície  $i$  oriunda de todas as superfícies, utiliza-se a Equação 3.12.

$$A_i G_i = \sum_{j=1}^n F_{ij} A_i J_j \quad (3.12)$$

Efetuada as devidas substituições, da Equação 3.8 finalmente obtemos a Equação 3.13:

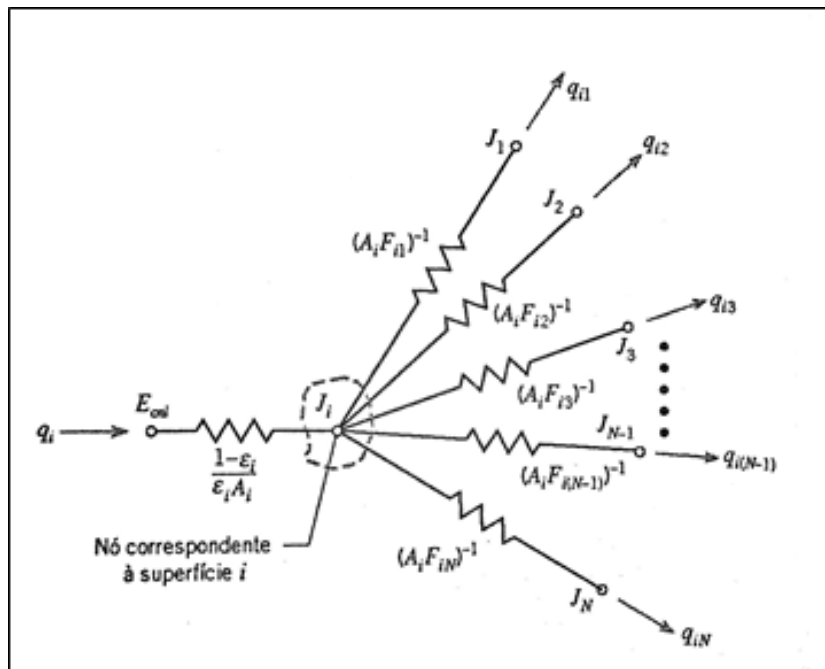
$$q_i = \sum_{j=1}^n \frac{J_i - J_j}{(A_i F_{ij})^{-1}} \quad (3.13)$$

Cada componente pode ser representado por um elemento em uma rede, para o qual  $J_i - J_j$  é o potencial motriz e  $(A_i F_{ij})^{-1}$  é a resistência geométrica. Essa rede de nós é mostrada na **Figura 21**.

Para a quantificação da energia radiante incidente no leito, utilizaram-se dimensões conforme as mostradas na **Figura 18**.

Os seguintes dados foram ainda necessários para o cálculo do fluxo de radiação líquido:

- O tempo mínimo necessário para o aquecimento do cone é de aproximadamente 15 min, só então há exposição do combustível ao fluxo de calor radiante.
- A temperatura do aquecedor quando em funcionamento, após os 15 min, foi medida em torno de 570 °C para apenas uma resistência ligada e 810 °C para as duas resistências ligadas.
- O ambiente estava a 25 °C.
- As emissividades do aquecedor e do reator foram aproximadas para 0,9.



**Figura 21** – Representação da rede de troca radiante entre a superfície i e as superfícies restantes.

Após a execução dos cálculos conforme descrito anteriormente encontrou-se um fluxo radiante líquido na superfície do reator de aproximadamente 30 kW/m<sup>2</sup> para uma resistência em funcionamento e de 55 kW/m<sup>2</sup> para as duas resistências em funcionamento.

### 3.1.1.2 Calibração do cone de ignição

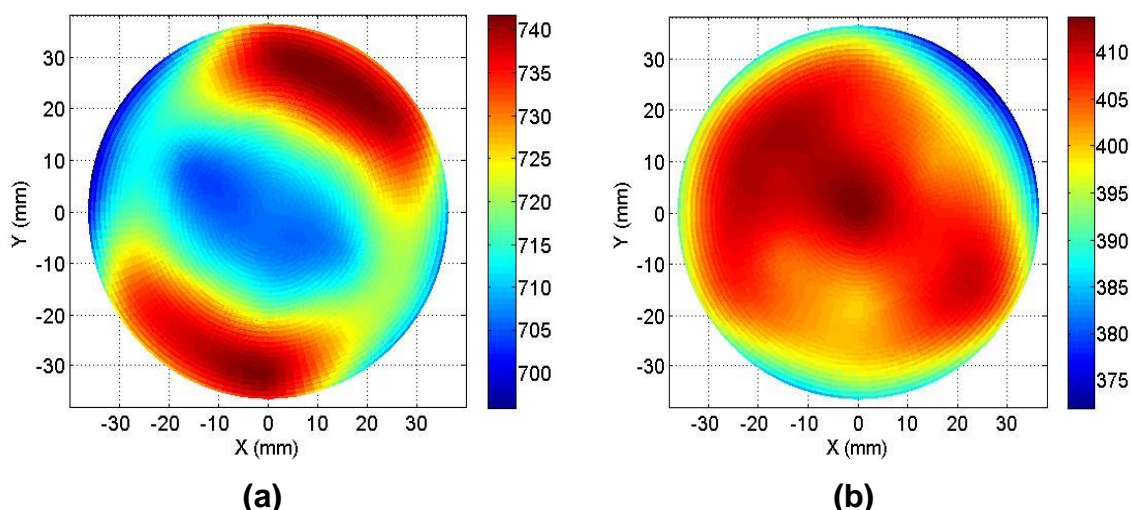
A calibração do cone de ignição foi realizada para os dois arranjos possíveis (uma ou duas resistências em funcionamento). Vários termopares foram estrategicamente

distribuídos no plano localizado a 50 mm abaixo do cone. Essa medida seria a distancia entre a superfície do combustível e o cone durante os experimentos.

Após um determinado tempo de aquecimento do cone de ignição (cerca de 15 min), os perfis de temperatura gerados pela aquisição das temperaturas de cada termopar atingiram o regime permanente.

Os dados de temperatura foram interpolados em software computacional (OCTAVE) e obteve-se a distribuição de temperatura atuando no topo do combustível no momento da ignição, conforme pode-se observar na **Figura 22**.

Ohlemiller et al. (1998) em seu trabalho também obtiveram a superfície de temperatura imposta pela fonte de ignição para saber a característica da ignição do combustível.

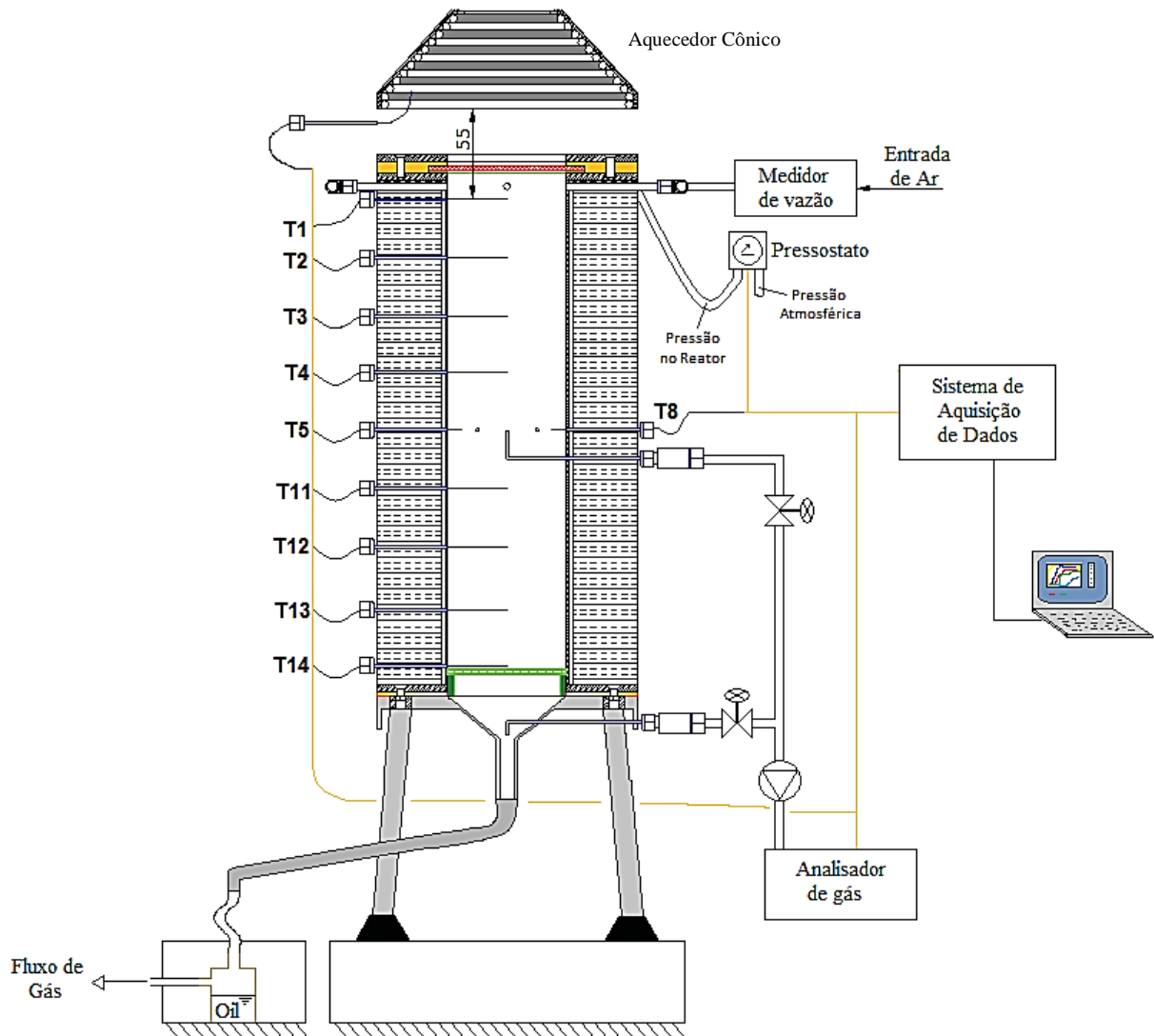


**Figura 22** – Distribuição de temperaturas imposta pelo cone sobre o combustível.

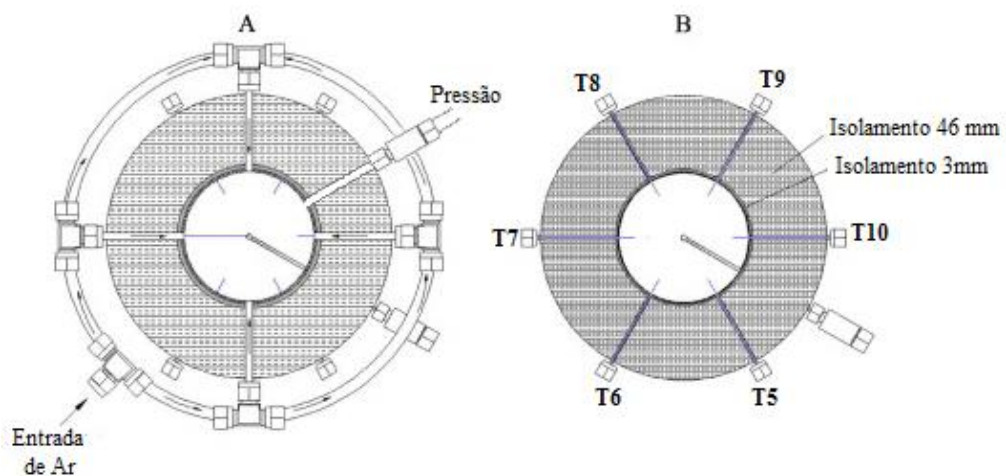
a) 55kW/m<sup>2</sup> (duas resistências ligadas); b) 30kW/m<sup>2</sup> (uma resistência ligada).

### 3.1.2 Reator de combustão

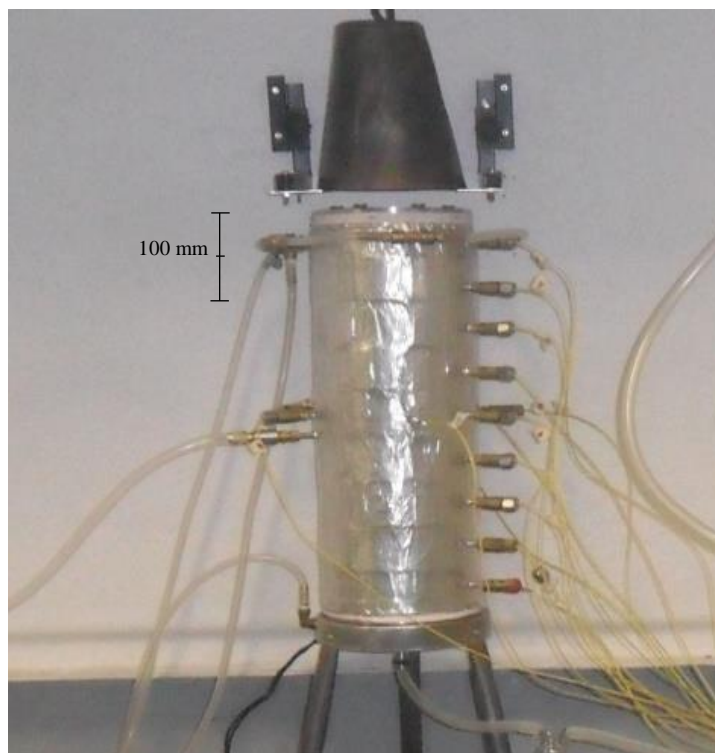
Foi desenvolvido um dispositivo experimental para a realização do presente trabalho. As **Figura 23** e a **Figura 24** mostram um esquema do dispositivo. O leito do reator consiste em um cilindro vertical de aço inoxidável, diâmetro interno de aproximadamente 73 mm e altura 450 mm. A **Figura 25** mostra uma foto real do reator. O diâmetro foi projetado amplo o suficiente para limitar as perdas de calor através das paredes do reator, e ao mesmo tempo estreito o suficiente para evitar a preparação de grandes amostras experimentais.



**Figura 23** - Esquema do dispositivo experimental utilizado.



**Figura 24** - a) Seção transversal na altura da entrada de ar. b) Seção transversal na meia altura da célula mostrando a coroa de termopares.



**Figura 25** - Foto do reator e aquecedor cônico.

O cilindro é rodeado por dois tipos de materiais isolantes térmicos: 3 mm de uma manta térmica (Superwool 607 blanket, Thermal Ceramics, condutividade térmica de  $0.28 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  a  $982 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e 46 mm de espessura de fibras refratárias (Kaowool HS 45 Board, Thermal Ceramics, condutividade térmica de  $0.21 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  a  $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). A grelha está localizada na parte inferior da câmara, e consiste de uma malha de aço inoxidável. Na saída da célula há um sistema para lavagem dos gases e o gás sai através do sistema de exaustão. A entrada de ar é projetada para fornecer fluxo de ar ininterrupto em uma forma simétrica. Um grupo de oito termopares em linha de 1,5 mm de diâmetro e 122 mm de comprimento (T1, T2, T3, T4, T11, T12, T13, T14) estão localizados em  $Z=0, 45, 90, 135$  e  $225, 270, 315, 360$  mm (medindo do topo para o fundo do reator), permitindo medir a temperatura ao longo do eixo da célula em diferentes alturas. Uma coroa de seis termopares iguais aos descritos anteriormente, porém de 95 mm de comprimento (T5, T6, T7, T8, T9, T10), a 6,5 mm da parede, permite medir a temperatura ao longo de um plano horizontal que está localizado em  $Z=180$  mm. Esta disposição permite revelar a geometria e distribuição transversal de temperatura da frente de combustão. Um sistema de micro-amostragem conectado a um analisador de gás mede as porcentagens volumétricas dos produtos gasosos da combustão com aquisição em tempo real. O sistema

possui dois pontos distintos de amostragem, um encontra-se na parte inferior do reator e o outro está na meia altura do reator. A pressão no topo do reator e as temperaturas ao longo do leito são continuamente registradas e monitoradas através de um software de aquisição de dados.

### 3.1.3 Analisador de gás

Para uma melhor investigação da frente de combustão foi utilizado o aparelho teste M/XL, fabricante CE (**Figura 26**), que tem a função de medir as frações molares em base seca dos produtos gasosos da combustão  $O_2$ ,  $CO$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $C_xH_y$ ,  $H_2$  e  $NO_x$ , com auxílio de células eletroquímicas, e a fração molar em base seca de  $CO_2$ , com auxílio de uma célula infravermelho.



**Figura 26** – Analisador de gás teste M/XL

### 3.1.4 Bancada de ensaios completa

A bancada (**Figura 27**) é formada pelo reator, sistema de alimentação de ar, termopares previamente posicionados ao longo do reator, sistema de aquisição de dados, aquecedor cônico, analisador de gás e equipamentos auxiliares (cilindro de nitrogênio para extinção de chama, rotâmetro, pressostato, exaustor, etc).





**Figura 27** – Bancada de ensaios

### 3.2 PREPARAÇÃO DO COMBUSTÍVEL

Para a realização dos experimentos foram utilizados combustíveis simulados, conforme abordado no capítulo 2.

Materiais primários foram utilizados como base para criar diferentes composições para o combustível simulado. Os materiais escolhidos para a análise foram: Coque (utilizado como fonte de CF), Polietileno (utilizado como fonte de MV) e Areia (utilizada como fonte de materiais inertes - cinzas).

Em alguns ensaios o carvão foi utilizado devido ser o combustível sólido de maior utilização e o mais conhecido.

A escolha dos combustíveis se deu devido as suas maiores purezas na composição em relação a outros tipos de materiais. O coque é praticamente composto apenas por CF (Ottaway, 1982); o polietileno é composto apenas por MV (Duque, 2013); e a areia é composta apenas por materiais inertes. Assim, mudando-se a concentração de cada componente no combustível simulado foi possível criar diversas composições diferentes e simular diferentes tipos de combustíveis.

Ao utilizar esse tipo de combustível é necessária uma maior homogeneidade possível entre as partículas de cada material.

Para garantir a homogeneidade da mistura dos materiais foi necessário uniformizar a granulometria de cada material. Para isso cada um dos materiais passou por diferentes etapas de preparação.

### 3.2.1 Preparação do coque

As amostras de coque são derivadas da indústria metalúrgica e foram fornecidas pela empresa ArcelorMittal Tubarão (ES-Brasil) em forma de pedras irregulares de tamanho médio de 10 cm com aspecto mostrado na **Figura 28**. Esse tipo de coque é utilizado para produção de aços de alta qualidade.

O coque foi triturado manualmente, peneirado em peneira vibratória (**Figura 29**) para alcançar uma granulometria média de  $\sim 0,7$  mm.

Após isso as amostras foram secas em estufa (**Figura 30**), a  $120^{\circ}\text{C}$  durante 24 h para assegurar a eliminação da umidade. Por fim o material possuía o aspecto mostrado na **Figura 31**.



**Figura 28** – Amostras de pedras de coque



**Figura 29** - Peneira vibratória com diferentes tipos de faixas granulométricas.



**Figura 30** – Estufa utilizada para secar os materiais.



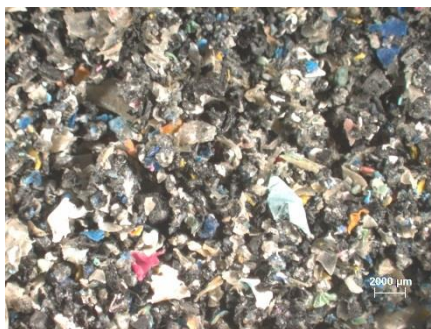
**Figura 31** – Coque conforme utilizado nos experimentos.

### 3.2.2 Preparação do Polietileno

As amostras de polietileno foram fornecidas pela empresa LuckPlast Inc. (ES-Brasil) em forma geométrica irregular de tamanho médio de 2 mm, Fig. 32, com uma densidade de  $949 \text{ kg m}^{-3}$  (determinado segundo o método de deslocamento). As amostras de polietileno são derivadas da segunda reciclagem de resíduos de polietileno a partir de resíduos sólidos urbanos. Uma vez recolhidos são classificados, lavados, e triturados na indústria de reciclagem, resultando no material mostrada na **Figura 32**.

Para uniformizar a granulometria do polietileno em torno de  $\sim 0,7 \text{ mm}$ , o material também foi peneirado e por fim possuía o aspecto indicado na **Figura 33**.

O Poder Calorífico Superior do polietileno foi de  $48,1 \text{ MJ kg}^{-1}$ , determinado pelo método de Dulong (ASTM 5373-93-CE Instruments / EA 1110). O teor de umidade e cinzas foram determinados pela norma ASTM 3173-87 e ASTM 3174-00, respectivamente. O teor de matérias voláteis, 98,75% em peso, foi determinada por diferença.



**Figura 32** - Amostras de polietileno conforme recebidas.



**Figura 33** – Polietileno conforme utilizado nos experimentos.

### 3.2.3 Preparação da areia

A areia utilizada é derivada de materiais de construção, e portanto foi necessário garantir que não haveria contaminantes ou materiais não inertes presentes na areia. Para isso a areia foi peneirada até atingir a faixa de  $\sim 0,7$  mm e depois foi exposta à chama de um maçarico a gás para eliminar os materiais não inertes. Por fim a areia possuía o aspecto mostrado na **Figura 34**



**Figura 34** – Areia conforme utilizada nos experimentos.

### 3.2.4 Combustível simulado

Após os métodos de uniformização granulométrica, todos os materiais utilizados para o combustível modelo simulado possuíam granulometria de ~0,7 mm. Assim, os materiais foram misturados em diferentes proporções mássicas criando diferentes composições conforme mostrado na **Tabela 1**.

**Tabela 1** – Diferentes composições utilizadas nos ensaios (% em massa)

Composição	Coque (CF)	Polietileno (MV)	Areia (Cinzas)
C1	20	30	50
C2	20	40	40
C3	20	60	20
C4	40	40	20
C5	40	25	35
C6	40	60	0
C7	60	40	0
C8	60	35	15
C9	60	20	20

Essas composições foram escolhidas com base na composição dos combustíveis sólidos existentes mais comumente utilizados, e ainda alguns resíduos que estão sendo empregados como combustível (García et al., 2012). Assim, esses diferentes combustíveis simulados permitiram analisar a influência da composição do leito no comportamento da ignição e propagação da frente de combustão.

## 3.3 METODOLOGIA PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Os ensaios realizados se dividiram em duas etapas, cada uma com suas características:

### 3.3.1 Análise da influência da composição do leito na ignição e propagação da frente

Foram obtidos o comportamento da ignição do combustível e foi observado se a frente iria propagar-se. Utilizou-se diferentes composições para o combustível simulado (utilizando coque, polietileno e areia).

Apenas os três primeiros termopares do reator foram utilizados para observar se a frente realmente se propagaria após a ignição. A grelha estava localizada logo abaixo do terceiro termopar. A vazão de ar nesses experimentos foi de  $1,090 \text{ kg h}^{-1}$  correspondendo a uma Velocidade de Darcy ( $V_d$ ) de  $0,058 \text{ m s}^{-1}$  a  $25,0 \text{ }^\circ\text{C}$ . O fluxo de calor irradiante utilizado foi de  $55 \text{ kW/m}^2$ .

A **Tabela 2** mostra a aleatorização dos ensaios e a massa total de combustível simulado que foi utilizada no reator.

**Tabela 2 – Planejamento experimental**

Rodada	Ordem	Composição	Massa total (g)
R1	14	C1	324
	10	C2	291
	5	C3	240
	22	C4	260
	1	C5	315
	19	C6	225
	4	C7	230
	15	C8	241
	25	C9	270
R2	27	C1	328
	11	C2	285
	20	C3	235
	6	C4	266
	13	C5	321
	3	C6	227
	17	C7	224
	23	C8	246
	8	C9	273
R3	26	C1	321
	21	C2	287
	2	C3	242
	16	C4	263
	24	C5	319
	7	C6	219
	18	C7	228
	12	C8	246
	9	C9	267

Foi realizado um planejamento experimental (DOE) com ajuda do software Action. Para criar uma ordem experimental aleatorizada entre os ensaios. A aleatorização é essencial para uma boa conclusão, pois o experimentador não pode estar certo de todas as variáveis que influenciam o experimento, portanto desta maneira nos certificamos de que um maior número de variáveis externas influencia o experimento de maneira igual. Mesmo que alguém possa identificar e controlar algumas dessas

variáveis, complicações não planejadas são comuns. A aleatorização não evita complicações dentro do experimento, mas oferece alguma proteção contra vícios do experimento.

### 3.3.2 Análise das características de uma frente de combustão em propagação

Foram observados a retração do leito, os regimes de combustão existentes no leito e a influência da ignição na propagação da frente. Para esses ensaios foram utilizados todos os termopares do reator e o combustível utilizado foi o carvão ou então misturas de carvão e areia ou carvão e polietileno (PE). Nesses experimentos foram utilizadas as vazões de 0,676 kg/h correspondendo a uma Velocidade de Darcy ( $V_d$ ) de  $0,035 \text{ m s}^{-1}$  a  $25.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . A vazão de ar de 0,151 kg/h, correspondendo a uma Velocidade de Darcy de  $0,008 \text{ m s}^{-1}$  a  $25.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , também foi utilizada em alguns ensaios. O fluxo de calor utilizado nessa etapa foi de  $30 \text{ kW/m}^2$ .

A **Tabela 3** mostra as características principais de cada rodada de experimentos realizados.

**Tabela 3** - Informações dos experimentos da segunda etapa

<b>Combustível</b>	<b>Massa total (Kg)</b>	<b>Razão mássica</b>	<b>Velocidade de Darcy (<math>\text{m/s}^{-1}</math>)</b>	<b>Granulometria média (mm)</b>
Carvão	0,6527	1	0,035	2
Carvão	0,6522	1	0,008	2
Carvão/Areia	1,941	3:20	0,035	2
Carvão/PE	0,6146	10:2	0,035	2

## Capítulo 4

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo, dividido em duas seções, apresenta os resultados obtidos e as análises e discussões dos mesmos. A primeira seção apresenta os resultados da influência da composição do leito na ignição e propagação da frente de combustão, onde são discutidos os resultados de ignição e propagação da frente co-corrente obtidos para diferentes composições de leito. Foram utilizados os combustíveis simulados compostos por coque, polietileno e areia para obtenção desses resultados. A segunda seção aborda os resultados das características de uma frente de combustão em propagação, onde são discutidos a retração do leito, os regimes de combustão existentes e a influência da ignição na propagação da frente de combustão co-corrente. Foi utilizado um leito fixo composto por carvão, tendo em vista ser o combustível sólido mais estudado e de comportamento já conhecido. Frações de polietileno e areia foram adicionados no combustível para simular teores de MV e inertes, respectivamente.

#### 4.1 INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO LEITO NA IGNIÇÃO E PROPAGAÇÃO DA FRENTE

A ignição do combustível dentro do reator foi induzida pelo fluxo de calor proveniente do Aquecedor Cônico. Após decorrerem cerca de 15 minutos o aquecedor alcança sua temperatura máxima. Só então o combustível é exposto ao fluxo de calor de 55 kW gerado pelo aquecedor que induz uma temperatura de cerca de 710 °C na superfície do combustível (conforme **Figura 22-a**) fazendo-o aquecer rapidamente. A partir dos dados de temperatura gerados pelo termopar T1, foi possível observar o momento em que o combustível entra em ignição. O tempo de exposição ao fluxo (tempo de ignição) e a temperatura (temperatura de ignição) necessários para o combustível entrar em combustão foram registrados para as diferentes composições simuladas. A **Figura 35** apresenta o comportamento do fenômeno da ignição para



algumas das composições utilizadas. São apresentados os dados mais representativos de algumas composições.

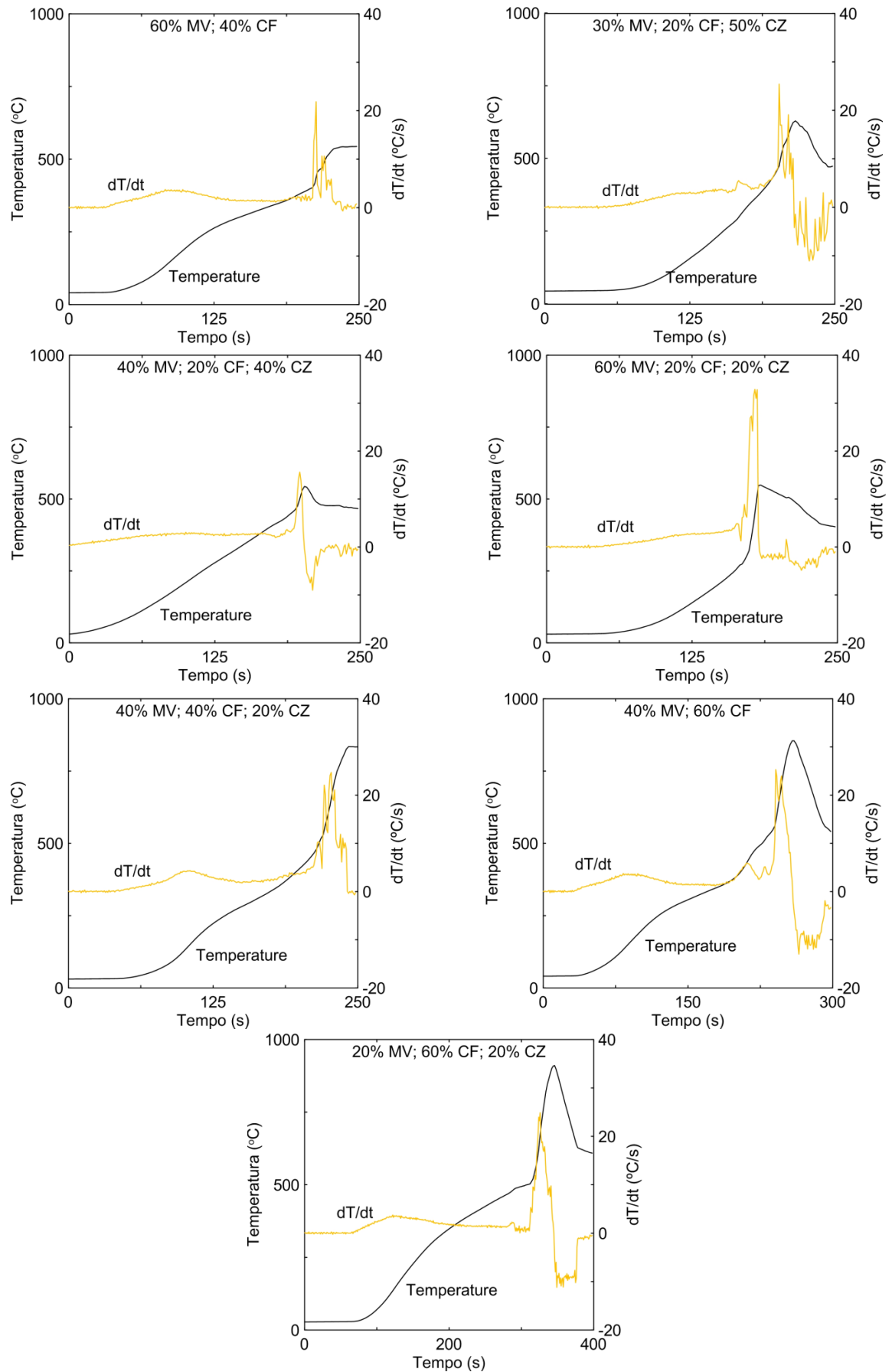
Para possibilitar identificar o momento em que o fenômeno se inicia foi utilizado a taxa de aquecimento do combustível, ou seja, a derivada da temperatura do combustível ( $dT/dt$ ). Utilizando apenas a evolução de temperatura fica difícil reconhecer o momento em que o combustível reage. Porém utilizando-se a derivada da temperatura consegue-se uma maior sensibilidade no registro dos dados, tornando possível identificar claramente o tempo e temperatura necessários para ignição do combustível. Observa-se que no momento em que o combustível reage, a derivada da temperatura aumenta rapidamente.

Pode-se ver claramente na **Figura 35** que quase sempre a taxa de aquecimento do combustível aumenta para valores acima  $20^{\circ}\text{C/s}$  no momento da ignição, o que indica que realmente estão ocorrendo no leito reações exotérmicas que provocam um aumento súbito da temperatura do leito. Logo após o combustível aumentar de temperatura subitamente devido ao calor liberado na reação observa-se que a taxa de aquecimento estabiliza-se num valor menor ou até mesmo diminui para valores abaixo de zero. Provavelmente isso se deve às reações endotérmicas que se iniciam e absorvem a energia liberada pela reação do combustível com o ar.

Além disso, devido à desvolatilização e oxidação do combustível ocorre uma retração do leito, tema que será abordado a seguir, fazendo com que o termopar T1 fique mais exposto ao fluxo de ar de alimentação e consequentemente se resfrie mais rápido.

Em relação aos valores máximos de taxa de aquecimento alcançados para cada composição notou-se uma aleatoriedade dos resultados. Em alguns casos os valores alcançam resultados acima de  $30^{\circ}\text{C/s}$  e em outros casos um pouco acima de  $10^{\circ}\text{C/s}$ , porém não encontrou-se uma relação direta desse dado com a composição do leito. Assim, essa característica da ignição do combustível vai além dos fatores considerados nesse estudo e provavelmente está relacionado à intensidade das reações exotérmicas e endotérmicas ocorrendo no leito.

Observou-se porém grandes influências da composição do leito de combustível na energia necessária para o mesmo entrar em ignição, o que resulta em diferentes valores de tempo e temperatura de ignição. A seguir são discutidas algumas dessas influências, bem como os desvios dos resultados para cada rodada de experimentos.



**Figura 35** - Comportamento da ignição do combustível para algumas composições.

Observa-se na **Figura 35** que quanto maiores os teores de MV na composição do combustível menores serão o tempo e temperatura de ignição do combustível. Em contrapartida um maior teor de CF resulta em maiores tempo e temperatura de ignição. Isso pode ser observado claramente comparando-se a composição 60% MV, 40% CF com a composição 40% MV, 60% CF. Pode-se notar que quanto menor a relação CF/MV menores são os tempos e temperaturas de ignição. Isso provavelmente se deve a maior facilidade para as reações de ignição homogêneas quando há um maior teor de MV na composição do combustível. Como serão liberados maiores quantidades de voláteis pelo material exposto ao calor, maior serão as chances desses voláteis reagirem com o ar e iniciarem o processo de ignição homogênea na fase gasosa. Esse raciocínio está de acordo com o trabalho de Yang et al. (2003) que observou que para maiores taxas de desvolatilização no combustível o tempo para a ignição será menor. Quando há maior presença de CF no combustível menores são as chances de ignição homogênea e mais lento será o início do processo, pois as reações deverão ocorrer na superfície do sólido (ignição heterogênea).

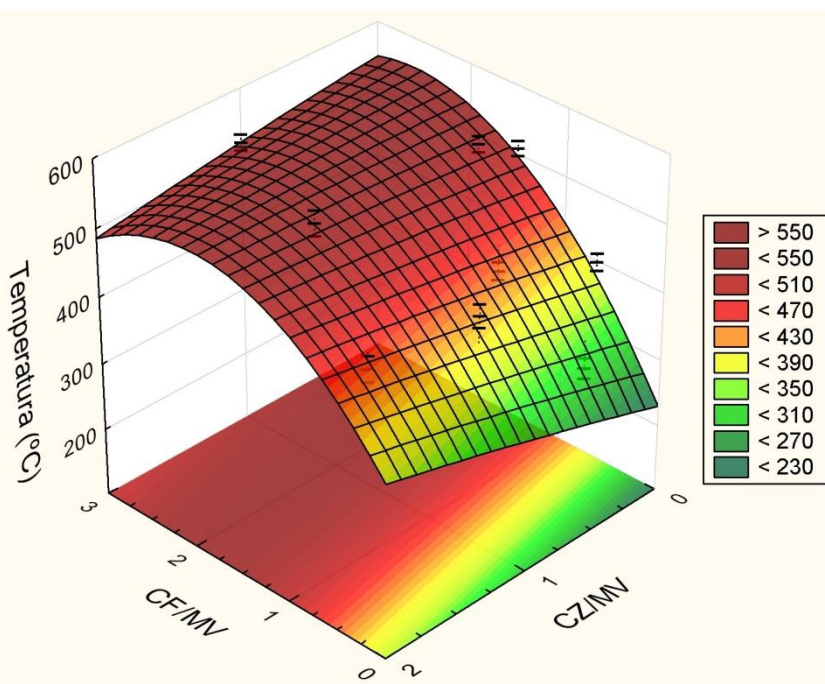
Observa-se também que se mantendo uma mesma proporção entre as quantidades de MV e CF no combustível mas aumentado-se, porém, a quantidade de materiais inertes (CZ) no mesmo, o combustível aqueceu mais rápido mas foi necessária mais energia (maiores valores de temperatura) para o mesmo entrar em ignição, o que acabou equilibrando, na média, os tempos para ocorrer a ignição. Isso é claramente visto quando se compara, por exemplo, o tempo e temperatura de ignição das composições 60% MV, 40% CF com as composições 30% MV, 20% CF, 50% CZ. Em relação ao menor tempo de aquecimento quando se aumenta o teor de inertes no combustível, isso se deve ao menor calor específico da areia em relação aos outros materiais. Assim, como a areia aquece mais facilmente, a mistura rica em areia aqueceu mais rápido. Já em relação às maiores temperaturas para ocorre a ignição, isso é causado pela menor pureza do combustível rico em inertes que necessitará de mais energia, e conseqüentemente, maiores temperaturas para entrar em ignição. Nos experimentos observou-se que embora a temperatura de ignição do combustível rico em inertes fosse maior, o tempo de ignição não sofreu grandes alterações devido ao fato da maior facilidade do inerte em questão, areia, aquecer mais facilmente. Assim, uma coisa acabou equilibrando a outra. Porém num combustível real isso depende do calor específico do material inerte que está

presente nele, pois caso esse valor seja elevado resultará num maior tempo para o combustível aquecer e entrar em ignição, o que está de acordo com os resultados obtidos por Binkau et al. (2014) e Van Blijderveen et al. (2010). Esse comportamento é atenuado para maiores concentrações de CF no combustível, uma vez que o maior tempo e temperatura necessários para ignição são devidos principalmente a maior quantidade de CF que resulta em reações de ignição heterogêneas mais lentas.

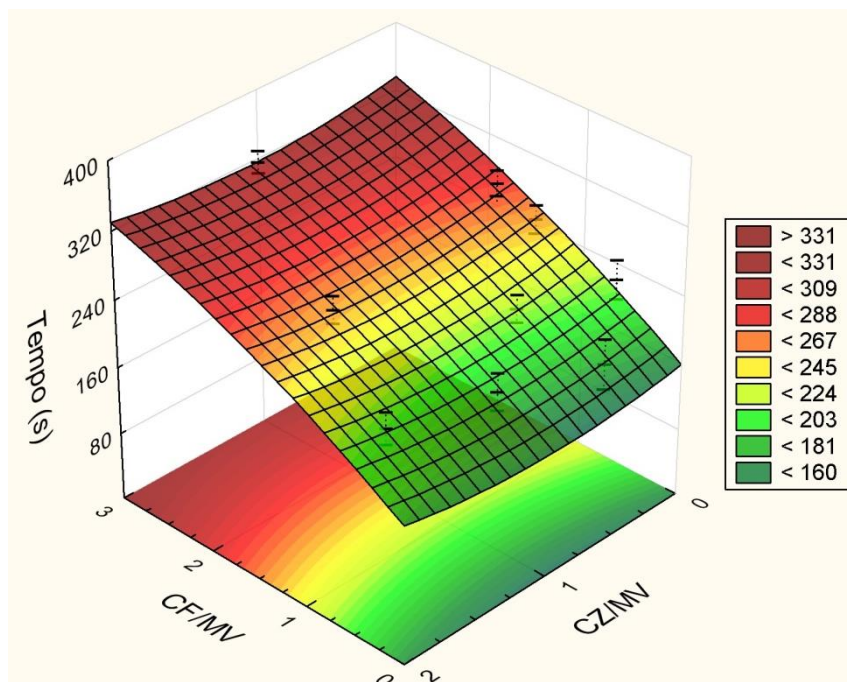
Para simplificar a observação dos resultados, dada a grande quantidade de dados, foram obtidas superfícies de resposta para visualização dos dados experimentais de temperatura e tempo de ignição, conforme a **Figura 36** e **Figura 37** respectivamente. Nessas superfícies observam-se claramente as características discutidas anteriormente.

Assim, foi obtido um mapeamento da característica da ignição para combustíveis sólidos em leito fixo.

Em cada rodada de ensaios para uma mesma composição houve variações nos valores obtidos, conforme se observa as barras de média e desvio padrão nas superfícies de resposta. A seguir discutem-se esses valores.



**Figura 36** – Temperatura necessária para a ignição do combustível em função de sua composição.



**Figura 37** - Tempo necessário para a ignição do combustível em função de sua composição.

Foi observado um maior desvio nos resultados de temperatura de ignição para uma maior concentração de MV em relação ao CF na mistura, ou seja, baixas relações CF/MV. Esse desvio se acentuava ainda mais para altas concentrações de inertes no combustível, ou seja, altas relações CZ/MV. Para os valores de temperatura de ignição o desvio padrão dos resultados alcançou um máximo de 38 °C para os ensaios utilizando a composição 30% MV, 20% CF, 50% CZ e um mínimo de 22 °C para a composição 40% MV, 60% CF.

Para os valores de tempo de ignição o desvio foi maior para altos teores de MV (ou seja, baixas relações CF/MV) sendo esse desvio atenuado a medida em que se aumentava o teor de inertes no leito (altas relações CZ/MV). O desvio padrão para esses resultados alcançou um máximo de 60 s para os ensaios utilizando a composição 60% MV, 20% CF, 20% CZ e um mínimo de 27 s para a composição 20% MV, 60% CF, 20% CZ.

Esse comportamento indica que a ignição de um combustível rico em voláteis deve ser mais variável em relação a um combustível rico em CF. Além disso, uma maior impureza (maior teor de cinzas) no combustível faz a temperatura de ignição variar ainda mais. Provavelmente essa maior variação da ignição de combustíveis ricos em voláteis seja devido à outros fenômenos envolvidos no ensaio como, por exemplo, a

atenuação do fluxo de radiação proveniente do aquecedor cônico pelos voláteis que se desprendem do combustível. Zhou et al. (2010) estudou a fundo a atenuação do fluxo de radiação pelos voláteis desprendidos de um combustível sólido durante a ignição do combustível submetido à radiação proveniente de um aquecedor cônico semelhante ao utilizado no presente trabalho. O autor encontrou que a atenuação do fluxo de radiação nessa situação pode variar de 6% a 14% o que causa variações na ignição do combustível e deve ser levado em conta. Isso pode explicar o maior desvio dos resultados ao se utilizar uma composição com alto teor de MV. Isso somado a mais uma variável, como o teor de inertes no combustível pode gerar ainda mais desvios nos dados obtidos.

Após a ignição do combustível constatou-se a possibilidade da frente de combustão se propagar ou então se ela se extinguiria. Para isso foram utilizados os três primeiros termopares do reator, T1 (linha preta-continua), T2 (linha vermelha-círculos) e T3 (linha azul-triângulos), totalizando um caminho mínimo de 90 mm para a frente se propagar. A **Figura 38** mostra alguns dos resultados de interesse da evolução da temperatura nos termopares para a observação da propagação da frente após a ignição do combustível. A partir dos resultados observa-se que após a ignição do combustível e estabilização da frente no leito ocorrem dois estágios de propagação: inicialmente há uma queda rápida a partir da temperatura de pico após a frente passar pelo ponto, conforme se observa nos termopares T1 e T2. Após isso, há um segundo estágio no final do leito de maior duração e onde as temperaturas alcançam valores mais altos, conforme se observa pelo termopar T3.

No início há um estágio comum de propagação da frente, conforme se observa na literatura (Bar-Ilan et al., 2005; Thunman e Leckner, 2003; Wang et al., 2003). Os valores de temperatura nos termopares aumentam subitamente quando a frente passa através deles e decrescem após a sua passagem. Porém, nos ensaios com altos teores de MV no leito (baixas relações CF/MV), observa-se que o pico de temperatura nos termopares superiores (T1 e T2) são menores e duram muito pouco tempo quando comparado com os trabalhos da literatura. Esse comportamento se deve a retração sofrida pelo leito devido a secagem e desvolatilização do combustível fazendo seu volume diminuir. Essa retração expõe os termopares superiores ao fluxo de ar de alimentação fazendo com que a região arrefeça mais

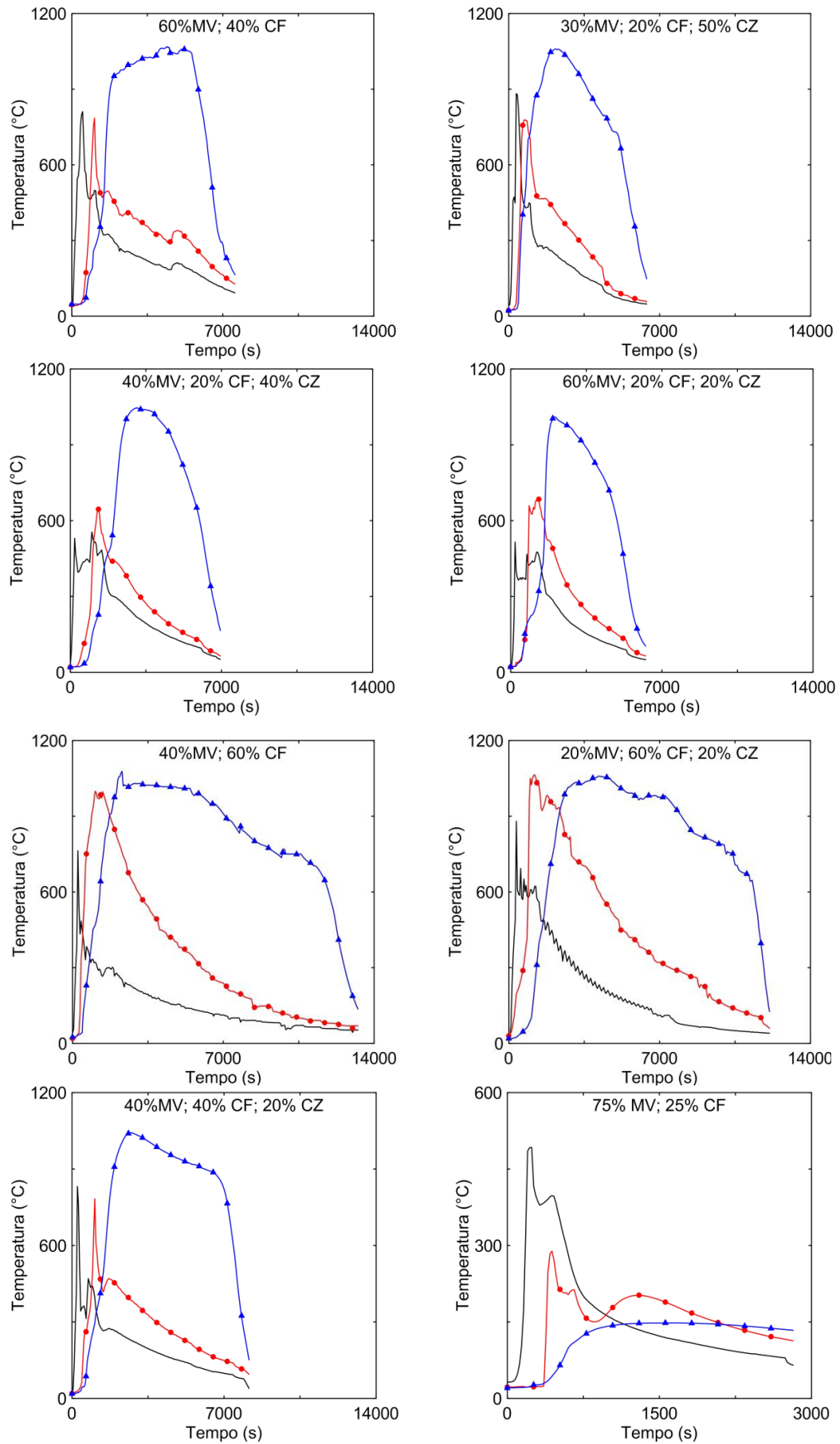
rapidamente e as temperaturas medidas sejam menores. Esse fenômeno também foi observado por Ronnback et al. (2001) utilizando a madeira como combustível. Quando há alto teor de inertes no combustível (altas relações CZ/MV) a retração sofrida pelo leito é atenuada, conforme verificado por Duque (2013), e pode-se então observar uma maior duração dos picos de temperatura nos termopares superiores. Esse comportamento de menores temperaturas no início do experimento também pode ser devido a outro fator. Conforme observado por Yang et al. (2003), quando há maiores taxas de desvolatilização no leito as temperaturas de pico no leito serão menores. Assim, como no primeiro estágio da propagação da frente o leito possui altos teores de MV, haverá uma alta taxa de desvolatilização do combustível e, portanto, menores temperaturas no leito. Isso se deve ao fato da reação de desvolatilização ser endotérmica e absorver parte da energia liberada nas reações exotérmicas de oxidação.

Pode-se ver claramente que à medida que se diminui a quantidade de MV no combustível as temperaturas na parte superior são maiores e permanecem por mais tempo, tanto devido à menor retração do leito como às menores taxas de desvolatilização que conseqüentemente absorvem menos energia das reações de oxidação.

No segundo estágio da propagação da frente, que ocorre no final, as temperaturas alcançadas são maiores e permanecem por mais tempo. Observa-se que a medida que se aumenta o teor de CF no combustível (altas relações CF/MV) tem-se uma maior duração desse segundo estágio.

Nesse estágio há a oxidação do CF remanescente no combustível. Tanto a umidade como o MV do combustível já foram varridos do leito pela frente de combustão e no final apenas o CF é oxidado sob um suprimento máximo de oxigênio (combustão limitada pela reação, conforme será abordado posteriormente), resultando em maiores temperaturas no leito.

Outro fator que contribui para as maiores temperaturas nesse estágio é a menor taxa de desvolatilização. Uma vez que a taxa de desvolatilização na parte final do experimento é praticamente zero, visto que todo o MV já foi varrido do leito, as temperaturas serão maiores, pois menos energia será absorvida pelas reações endotérmicas de desvolatilização. Resultados bem semelhantes foram observados nos estudos realizados por Yang et al. (2003) utilizando madeira e resíduos urbanos.



**Figura 38** – Verificação da propagação da frente após a ignição do combustível.



Um aspecto importante dos ensaios realizados foi a impossibilidade da propagação da frente para composições com teores de MV maior do que 75%. Após a ignição do combustível a frente se extinguiu, conforme pode-se ver, por exemplo, para a composição 75% MV 25% CF na **Figura 38**. Essa característica dos ensaios provavelmente se deve a grande absorção de energia devido à desvolatilização do MV no leito que superou a energia liberada pela oxidação do combustível, tornando impossível a propagação da frente. Essa situação é particular às condições experimentais do presente estudo. Combustíveis comuns, como alguns tipos de biomassas possuem em sua composição cerca de 75% de MV e ainda assim conseguem manter uma frente de combustão em leito fixo. Porém, ao utilizar um combustível simulado alguns desvios como esse são observados. Provavelmente essa situação aconteceu devido à não homogeneidade do combustível simulado quando comparado ao combustível real e ainda devido as diferentes composições entre o MV contido no combustível real e o MV do polietileno, que é composto por moléculas de maior massa molecular e cadeias longas. As moléculas maiores do polietileno absorvem mais energia para serem quebradas do que a grande variedade de moléculas, grandes e pequenas, presentes num combustível real como, por exemplo, a madeira. Portanto, ao utilizar o combustível simulado deve-se ter consciência das diferenças em relação ao real e as hipóteses consideradas devem ser cautelosas para não serem tomadas conclusões precipitadas. Comparando-se os resultados obtidos pela modelagem do combustível com os resultados de combustíveis reais, conforme foi feito nesse estudo, pôde-se verificar a verossimilhança da modelagem.

Assim, graças à comparação com os resultados de trabalhos presentes na literatura, pôde-se notar que algumas das características observadas para a ignição e propagação do combustível simulado são próximas às características de um combustível natural e, assim, algumas conclusões puderam ser alcançadas.

Em suma, ocorrem basicamente três estágios de combustão no leito. O primeiro deles é o estágio de ignição do combustível, conforme abordado anteriormente. O segundo estágio é o de propagação da frente sob altas taxas de retração do leito, onde ocorrem a evaporação da água, desvolatilização e a oxidação do CF bem como a possível oxidação de parte do MV que é liberado pelas altas temperaturas. Nesse segundo estágio provavelmente há um regime de combustão limitada pelo oxigênio. O terceiro e último estágio é o de oxidação do CF remanescente, onde

toda a umidade e o MV do combustível já foram varridos e apenas o CF, provavelmente sob o regime de combustão limitada pela reação, sofre oxidação resultando em maiores temperaturas.

A identificação e conhecimento desses três estágios são importantes para prover informações sobre o suprimento de ar requerido em cada estágio e ajudar a aumentar o desempenho de fornos e equipamentos que envolvam conversão térmica.

#### 4.2 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DE UMA FRENTE DE COMBUSTÃO EM PROPAGAÇÃO

Na etapa anterior, algumas características da propagação da frente de combustão foram levantadas mas não foram abordadas a fundo para um regime mais amplo de propagação da frente. Assim, foram realizados alguns ensaios utilizando todo o comprimento do reator para averiguar, durante uma propagação mais extensa e plenamente desenvolvida da frente, as questões levantadas anteriormente: retração do leito; regimes de combustão existentes durante a propagação da frente; e influência da ignição no comportamento da frente. Essas características da propagação da frente foram analisadas utilizando o leito fixo composto por carvão, tendo em vista ser o combustível sólido mais estudado e de comportamentos já conhecidos. Para analisar a influência de alguns fatores algumas características foram variadas em cada rodada de experimentos. Para se observar a influência do suprimento de ar duas vazões diferentes foram utilizadas. Em relação à influência da composição do leito, foi utilizado novamente a modelagem do combustível através de combustíveis simulados. Utilizou-se o carvão puro e misturas de carvão e polietileno (PE) (simulando um combustível rico em MV) e carvão e areia (simulando um leito rico em materiais inertes, como por exemplo o existente na sinterização, combustão in-situ, etc). Os detalhes estão descritos na seção 3.3.2.

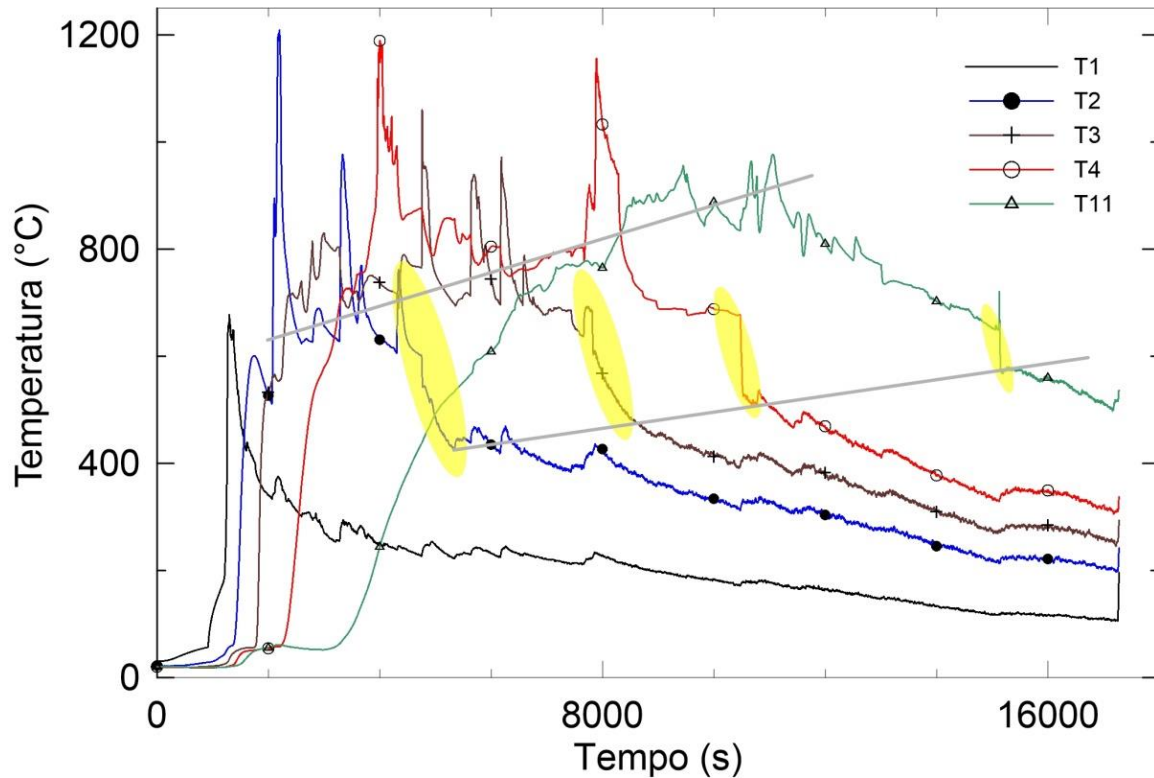
##### 4.2.1 Retração do leito

Para se observar mais detalhadamente a retração sofrida por um leito de combustível durante a propagação de um frente de combustão, e como a vazão de

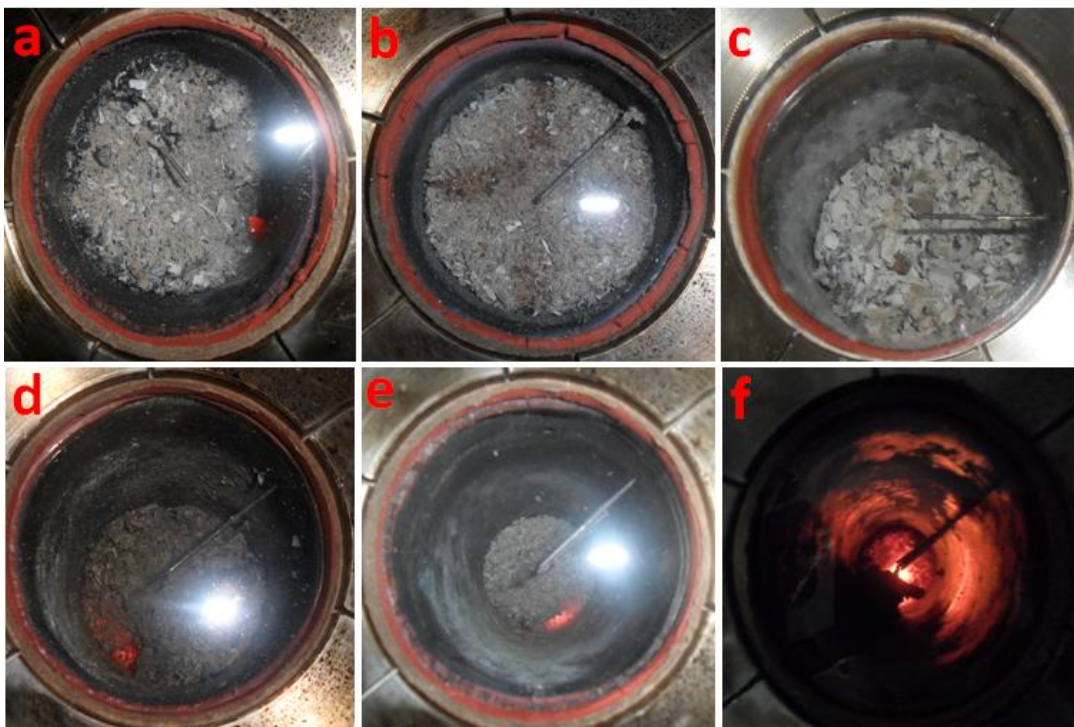
ar e a composição do combustível influencia esse fenômeno, foram realizados ensaios no reator completamente preenchido. Para se obter esses dados da retração do leito no tempo foi utilizado um novo método. Através das medidas de temperatura dos termopares axiais do leito pôde-se acompanhar a posição da frente e a altura do leito, juntamente com a observação visual a partir da janela de quartzo no topo do reator.

A **Figura 39** mostra como foi possível observar a partir da evolução da temperatura de cada termopar a retração sofrida pelo leito. A partir do momento em que a altura do leito vai diminuindo e expõe o termopar ao ar de alimentação, a temperatura medida sofre uma queda (conforme identificado pelas regiões em destaque na **Figura 39**) e pode-se verificar, através da comprovação visual, que a altura do leito está logo abaixo do termopar. A **Figura 40** mostra algumas imagens capturadas a partir da janela do reator indicando a posição em que o leito estava para diferentes situações nos ensaios realizados. Ainda na **Figura 39**, pode-se notar que a temperatura média do combustível tende a aumentar à medida que se caminha para o final do ensaio (linha diagonal superior), confirmando o que foi apresentado na seção anterior. Logo após o leito retrair e perder o contato com um termopar, o mesmo ficará exposto ao ar e a sua medida indicará a temperatura do ar antes de alcançar o leito. Assim, a linha diagonal inferior indica a temperatura do ar antes de alcançar o combustível. Pelo que se vê a temperatura do leito nas regiões a montante da frente estão ainda bem aquecidas, o que pôde ser confirmado durante os ensaios por se medir a temperatura da parede do reator na região onde a frente já havia passado. Logo, nesse estágio do experimento provavelmente a propagação da frente possuía uma estrutura *reaction leading*, visto que a propagação de frente de reação estava a frente da propagação da transferência de calor.

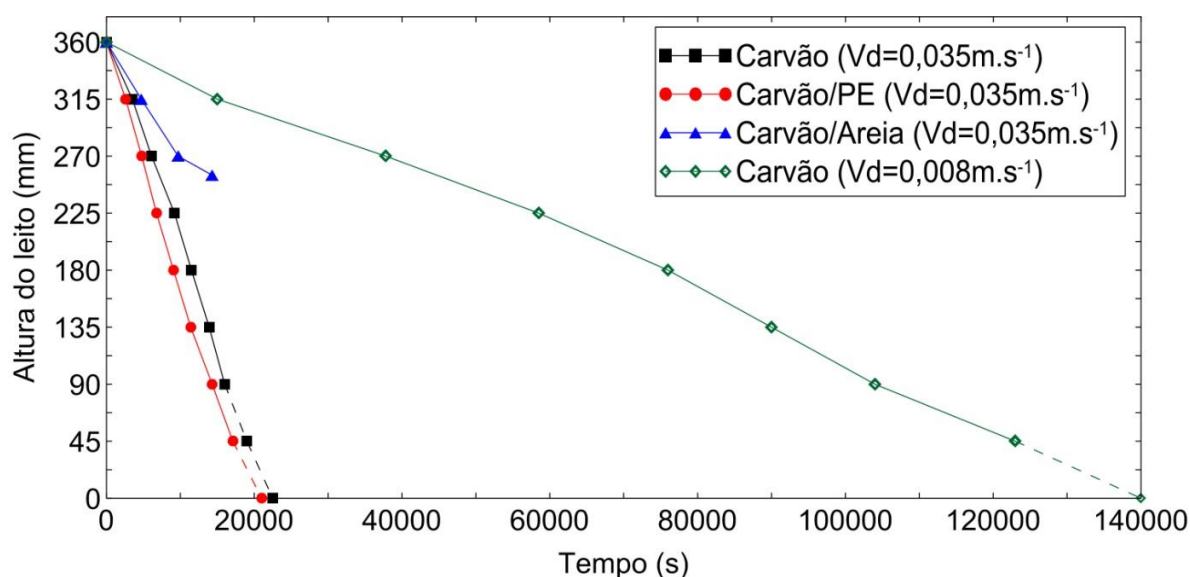
Assim, foi obtida a altura do leito no decorrer do tempo sendo, portanto, possível quantificar a retração sofrida pelo leito no decorrer do tempo. Os resultados médios para cada rodada de ensaios são apresentados na **Figura 41**. A Linha contínua foi obtida conectando-se os pontos experimentais onde havia termopares (símbolos). No final dos experimentos utilizando carvão e a mistura carvão e PE não foi possível medir a retração do leito, uma vez que o ensaio foi interrompido antes do fim. Portanto, foi feito uma estimativa da retração final sofrida com base nos dados existentes (linha tracejada).



**Figura 39** – Evolução da temperatura no tempo para alguns termopares do leito para identificar a retração do leito (ensaio com Carvão -  $V_d = 0,035 \text{ m.s}^{-1}$ ).



**Figura 40** – Alturas do leito ( $h$ ) para diferentes momentos da propagação da frente de combustão. a)  $h = 360 \text{ mm}$ ; b)  $h = 340 \text{ mm}$ ; c)  $h = 315 \text{ mm}$ ; d)  $h = 180 \text{ mm}$ ; e)  $h = 135 \text{ mm}$ ; f)  $h = 45 \text{ mm}$ .



**Figura 41** – Retração do leito de combustível no decorrer do tempo ( $V_d$  é a Velocidade de Darcy)

Observou-se, utilizando a mistura Polietileno/carvão (2:10 em peso), para simular um combustível rico em MV, que a retração do leito é realmente mais acentuada para combustíveis com maiores teores de MV em sua composição. Isso se deve principalmente a perda de volume devido à desvolatilização do combustível, em que o MV abandona o leito e causa sua acelerada retração. Além disso, observa-se para todos os casos que a velocidade de retração do leito varia ao longo do tempo. Isso é causado possivelmente pela maior retração do leito em certos momentos quando ocorrem colapsos no interior do leito devidos ao aparecimento de vazios provocados pela conversão do polietileno, fazendo a retração ser ainda mais acelerada em certos momentos. Além disso, quando a zona de reação possui uma dimensão considerável, pode haver locais mais abaixo do leito onde a estrutura do material já sofreu oxidação e perdeu sua resistência para suportar as camadas mais acima, o que acaba resultando em colapsos do leito para baixo. Um comportamento semelhante também foi observado por outros trabalhos na literatura (Duque, 2013; Hermansson e Thunman, 2011; Monhol e Martins, 2015).

Para a mistura de carvão/ areia (3:20 em peso), simulando um leito com pouco teor de combustível (aplicações na sinterização, combustão in-situ, etc), notou-se uma maior velocidade de propagação da frente, tendo em vista que o tempo de consumo do combustível no leito foi menor, e que após a frente passar por todo o leito houve

uma retração de apenas 28% em relação ao volume inicial. Devido ao grande teor de material inerte (87%) na composição do leito, o consumo e a consequente retração total do leito não foi possível. Martins et al. (2010) observou uma retração total do leito de 16% em seu experimento utilizando 3,7% de carvão numa mistura carvão e areia. O autor porém não obteve a evolução da retração no decorrer do tempo.

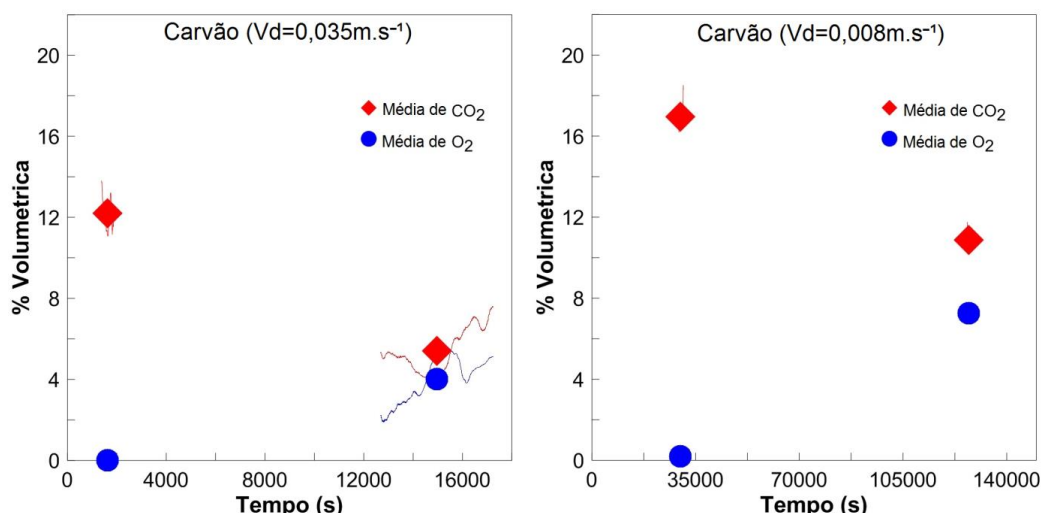
Em relação a influência da vazão de ar na retração do combustível é possível ver que para maiores valores de suprimento de ar a retração é mais acelerada devido à maior disponibilidade de oxigênio, à maior velocidade das reações e à maior dimensão da frente de combustão que consome uma porção muito maior do leito. Esse comportamento é observado em trabalhos existentes na literatura para diferentes arranjos de propagação da frente de combustão (Gómez et al., 2014; Shin e Choi, 2000; Yang et al., 2004).

Assim, conhecer o comportamento da retração do leito durante a passagem de uma frente de combustão é importante, pois se podem controlar alguns parâmetros de um dado processo industrial para permitir uma melhor eficiência. Por exemplo, em fornos de grelha móvel pode-se ajustar a velocidade da grelha ou a vazão de ar de acordo com o tipo de combustível a ser consumido de modo a aumentar o desempenho do forno. Outro tema importante, cujo conhecimento pode aperfeiçoar o funcionamento de um dado processo de combustão, é o regime de combustão existente no leito.

#### **4.2.2 Regime de combustão**

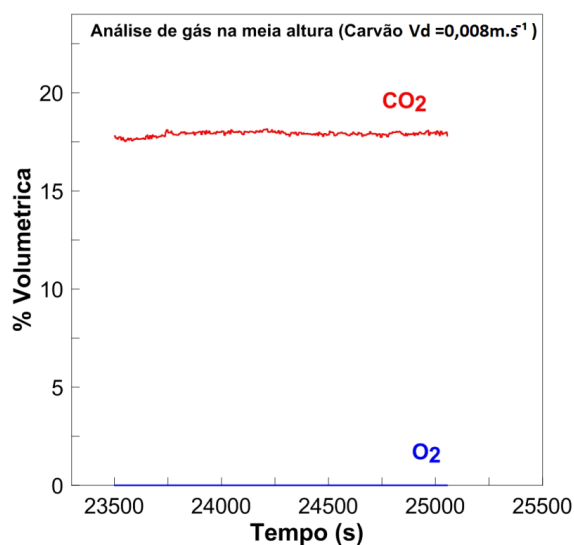
Para se verificar os regimes de combustão existentes no leito foram realizadas algumas análises de gás dos produtos formados durante a conversão térmica do combustível. Foi utilizado apenas o carvão como combustível, uma vez que o mesmo comportamento para os regimes de combustão existentes no leito foi observado para as diferentes composições na primeira etapa de ensaios. Na seção anterior foi levantada a ideia de que haveria dois regimes durante a propagação da frente: no início um regime de combustão limitada pelo oxigênio e no final um regime de combustão limitada pela reação. Para comprovar que realmente existem esses dois regimes durante a propagação da frente num leito composto por um

combustível natural, análises dos produtos formados a partir da propagação da frente foram realizadas em dois momentos do ensaio: na parte inicial e na parte final. A análise de gás foi realizada na saída do reator e os dados obtidos são mostrados na **Figura 42**. Realmente, observa-se a existência de dois regimes de combustão no reator para os dois experimentos com o carvão em vazões diferentes. No início do experimento há uma tendência para a combustão limitada pelo oxigênio, uma vez que a quantidade de oxigênio na saída é zero ou próximo de zero. Assim, o oxigênio é completamente consumido pelas reações, que alcançam seu limite devido à indisponibilidade de mais oxigênio. Já na parte final do experimento, observa-se a combustão limitada pela reação, visto que o oxigênio está presente em quantidade considerável na saída. Nesse momento há disponibilidade suficiente de oxigênio na zona de reação, porém, as reações não possuem capacidade de consumir todo o oxigênio disponível. Esse fenômeno se dá possivelmente devido a diminuição da quantidade de combustível e MV disponível no leito no fim do experimento em relação à quantidade de oxigênio disponível para a reação, que é sempre a mesma. Embora o comportamento seja o mesmo para os dois ensaios, observou-se uma diferença nas quantidades de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$ . Esse detalhe provavelmente pode ser devido a menor velocidade do escoamento no ensaio utilizando uma menor vazão, permitindo que os gases desvolatilizados sejam alcançados pela frente de combustão e sejam consumidos formando maior quantidade de  $\text{CO}_2$ . Isso pôde ser verificado durante os experimentos pela menor quantidade de condensados liberados na saída do reator no ensaio da menor vazão, indicando que os materiais voláteis foram consumidos pela frente.



**Figura 42** – Análise de gás na saída do reator para os ensaios utilizando carvão.

O gráfico da **Figura 43** para o ensaio de menor vazão, onde a amostragem foi realizada no início (bem antes da frente alcançar o ponto de amostragem), indica que os resultados são bem estáveis. O total consumo de oxigênio pela frente, que está logo acima da amostragem de gás, confirma que no início do experimento realmente há um regime de combustão limitada pelo oxigênio, conforme afirmado anteriormente. Isso comprova que da frente de combustão em diante não há mais oxigênio disponível leito abaixo e o teor de  $\text{CO}_2$  permanece constante.

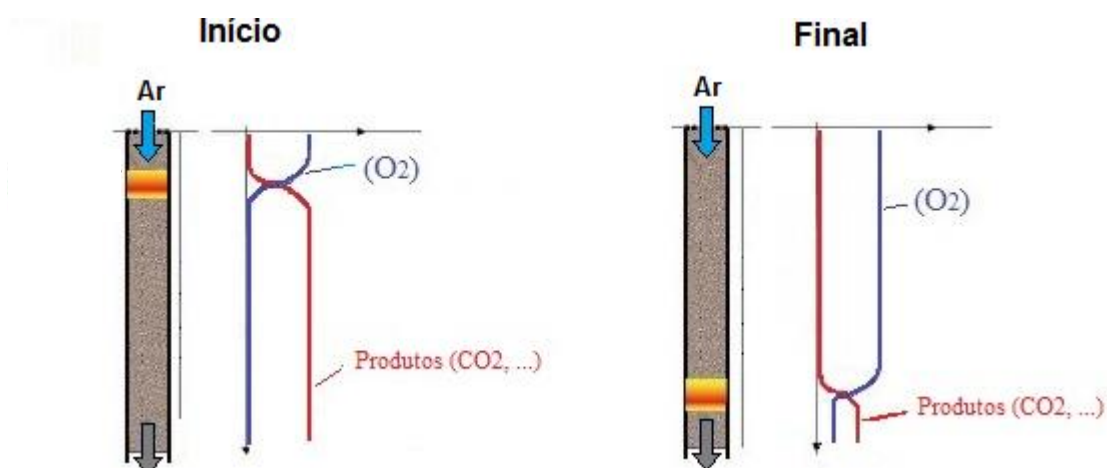


**Figura 43** - Análise de gás na meia altura do reator num intervalo antes da frente alcançar o sistema de micro-amostragem.

Portanto, pode-se esquematizar a distribuição de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  ao longo do leito nos instantes finais e iniciais do experimento, conforme mostrado na **Figura 44**.

Desse modo, foi comprovado que os regimes anteriormente propostos realmente estavam ocorrendo no leito. É importante identificar que o momento em que ocorre a transição entre os regimes é quando o MV do leito já foi totalmente varrido e só resta no leito o CF do combustível, que mesmo à altas taxas de reação não consegue consumir todo o oxigênio disponível, chegando a um momento em que a chama se extingue devido ao maior suprimento de ar em relação à pequena quantidade de CF no leito, conforme observado também por Shin e Choi (2000). Assim, aplicando esse conhecimento aos combustores industriais, esse ponto de transição de combustão limitada por oxigênio para limitada pela reação pode ser um bom momento para economizar nos sopradores de alimentação de ar e diminuir a vazão de ar para um valor ótimo.



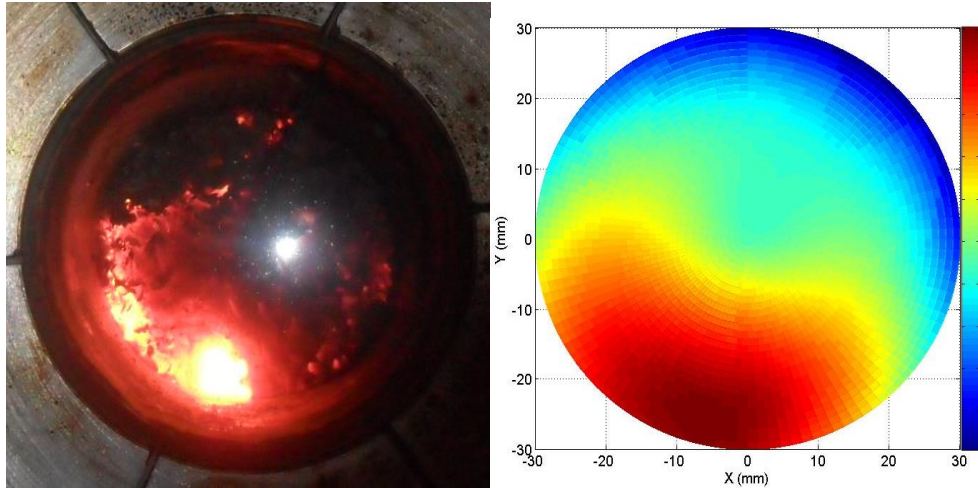


**Figura 44** - Distribuição de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  pelo reator durante os instantes iniciais (combustão limitada pelo oxigênio) e finais (combustão limitada pela reação) dos ensaios.

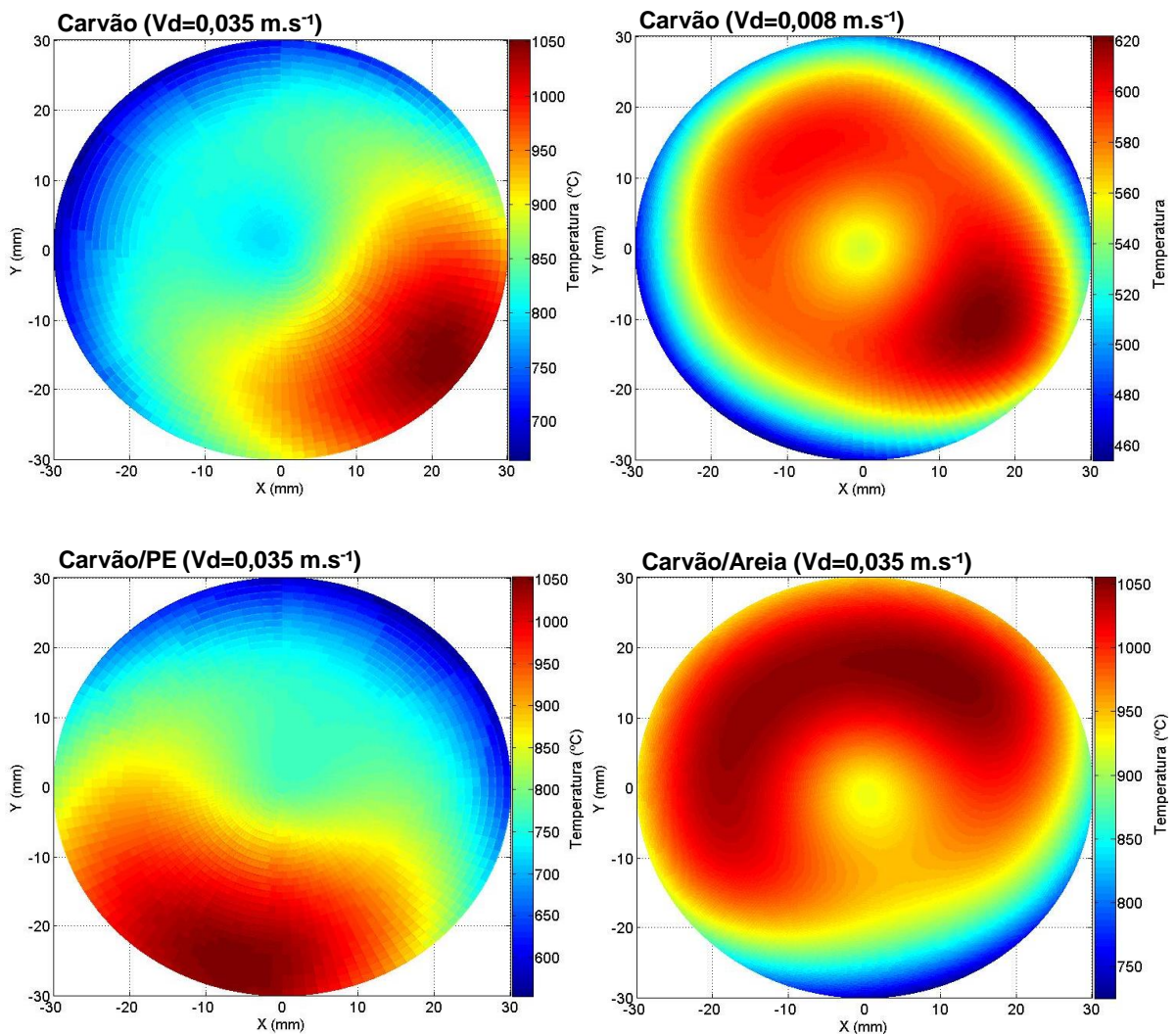
#### 4.2.3 Influência da ignição na propagação da frente

Dada a importância de saber como a fonte de ignição exerce influência sobre a propagação da frente, foi observado se as características da frente, após alcançar o regime plenamente desenvolvido, conservam os efeitos iniciais da ignição do combustível no leito. Para isso, foi analisado se a informação inicial da ignição, ou seja, a distribuição de temperatura imposta pelo dispositivo de ignição (**Figura 22-b**), teve alguma influência na característica da propagação da frente, seja na geometria ou na sua distribuição de temperatura. Assim, como nas situações anteriores, para obter a influência da vazão de ar e da composição do leito os ensaios foram realizados utilizando carvão em duas vazões de ar diferentes e duas misturas diferentes para simular um leito de combustível rico em MV (carvão/polietileno – 2:10 em peso) e um leito composto na sua maior parte por material inerte (carvão/areia – 3:20 em peso).

Para se observar as características da frente de combustão se propagando foi escolhido um ponto estratégico no leito do reator. Para obtenção dos dados de interesse foi utilizado uma coroa de termopares localizados à meia altura do leito, distante o suficiente das extremidades superior e inferior do leito, garantindo que a frente já estivesse plenamente desenvolvida e que as interferências da região de saída do reator não influenciassem nos resultados.



**Figura 45** – Observação visual da frente de combustão em propagação e sua distribuição de temperatura (Carvão/PE –  $V_d = 0,035 \text{ m.s}^{-1}$ )



**Figura 46** - Distribuição de temperatura na seção transversal da frente de combustão ( $V_d$  é a velocidade de Darcy).

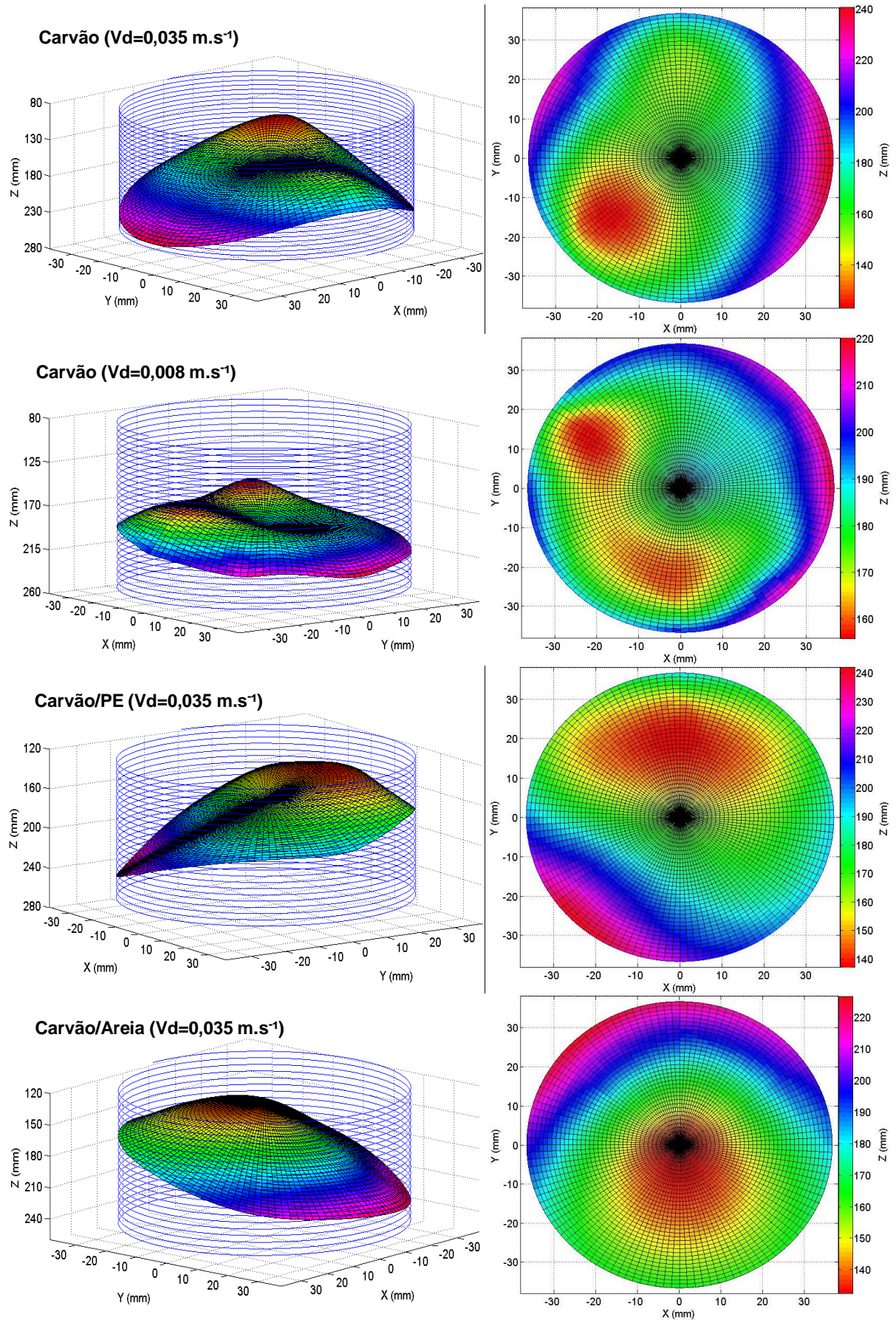
A partir da coroa de termopares foram medidos os valores de temperatura no momento em que a frente passava por esse local e, interpolando os outros valores, obteve-se a distribuição de temperatura na seção transversal do leito no momento em que a frente passava. Os dados obtidos são bastante verossímeis com o que realmente estava ocorrendo dentro do leito de combustível. A **Figura 45** mostra o momento em que a frente está passando pela coroa de termopares e a sua distribuição de temperatura transversal correspondente, conforme medida pelos termopares. Apenas é mostrado um esquema para indicar a semelhança visual entre os dados e a situação real, por isso o gráfico não tem valores. Os resultados quantitativos para as diferentes condições experimentais são mostrados na **Figura 46**.

Para obtenção dos dados de geometria foi necessário um conhecimento mais amplo do comportamento da frente. Conforme realizado por Martins et al. (2010), é possível, a partir dos dados de temperatura dos termopares localizados numa linha axial da célula de combustão, descobrir a velocidade de propagação da frente de combustão no interior do leito. Utilizando os tempos em que as temperaturas máximas são registradas nos termopares, e suas respectivas posições, pode-se calcular a velocidade média da frente.

A geometria da frente foi considerada constante e foi obtida no tempo médio ( $t_m$ ) dos tempos de pico de temperatura nos termopares da coroa. Usando-se a velocidade da frente e o tempo de pico de cada termopar, encontra-se a posição de cada ponto da frente no instante de tempo  $t_m$ . Ou seja, tem-se a velocidade, o intervalo de tempo ( $|t_{\text{pico no termopar}} - t_m|$ ) e a posição de cada ponto da frente no tempo  $t_{\text{pico no termopar}}$  (que é a própria posição do termopar), então, basta descobrir a posição de cada ponto da frente no tempo  $t_m$ . Assim, obtém-se a posição de alguns pontos da frente de combustão e interpolam-se os outros para se encontrar a geometria da frente. Essa foi a técnica utilizada para encontrar os dados apresentados na **Figura 47**.

A frente de combustão de maneira geral para essas condições experimentais tende a ser inclinada, e propagar-se primeiramente na periferia do leito. Esses resultados são semelhantes aos encontrados na literatura (Duffy e Eaton, 2013; Gómez et al., 2014; Martins et al., 2010).





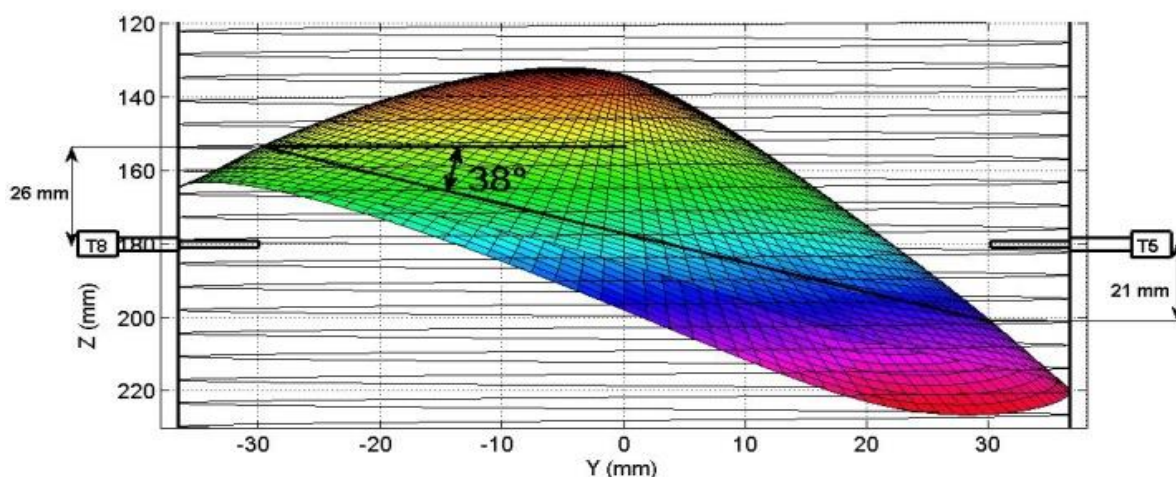
**Figura 47 - Geometria da frente de combustão ( $V_d$  é velocidade de Darcy).**

Com exceção da geometria da frente de combustão para o caso da mistura carvão/areia, as geometrias são bem distorcidas e assimétricas. Isso é devido às instabilidades no leito, que geram uma maior variação na frente de combustão no decorrer do experimento. Após a frente alcançar uma dada porção de combustível, a oxidação do mesmo faz com que perca as suas propriedades mecânicas e, não resistindo ao próprio peso, colapsa. Esses colapsos geram modificações constantes no leito (Hermansson e Thunman, 2011). Para o caso de um leito rico em MV as instabilidades tendem a ser ainda maiores, devido ao fato de antes mesmo da frente de combustão alcançar o combustível ele já se desvolatilizou e modificou o leito nas porções abaixo da frente, conseqüentemente mudando a geometria da mesma. Assim, num instante a frente está de uma forma e em outro mais a frente pode ter mudado completamente.

No experimento à baixa vazão de ar houve uma menor dimensão da frente, comprovada pela **Figura 47** que mostra uma amplitude de apenas 60 mm. Essa menor dimensão gera menores colapsos, ao contrário de uma frente de combustão muito grande para a qual a sua parte mais adiantada já está oxidando o combustível abaixo que conseqüentemente irá gerar colapsos de leito. Na distribuição de temperatura, notou-se a diferença na magnitude da temperatura, enquanto na alta vazão há um alcance de até 1050 °C, na baixa vazão o alcance é de 620°C.

Já no caso dos experimentos com carvão e areia observou-se uma maior uniformidade e o leito foi muito mais estável do que os dos outros. Assim, a frente pôde manter sua forma relativamente constante e caminhar de maneira mais simétrica. É provável que desde o início ela já tenha se manifestado com essa geometria. Pode-se notar que a parte mais quente da frente no instante mostrado na **Figura 46**, é a região localizada no segundo quadrante do sistema de coordenadas XY, que é justamente a região onde o fluxo de radiação proveniente do aquecedor cônico é mais intenso (**Figura 22-b**). Conforme se observa também na geometria desse experimento na **Figura 47**, essa região (segundo quadrante) é a que está mais avançada na geometria da frente, ou seja é a região que começou a se propagar primeiro no momento da ignição. Portanto, observa-se que a distribuição de temperatura imposta na ignição exerceu forte influência na distribuição de temperatura da frente, bem como na geometria da mesma.

A inclinação da frente, portanto, se deve as desuniformidades do fluxo de radiação do dispositivo de ignição. A frente demonstrou uma inclinação de  $38^\circ$ , conforme indicado na **Figura 48**.



**Figura 48** - Inclinação da frente de combustão mais estável.

Portanto, observou-se que uma alta porcentagem de material inerte no leito contribui para aumentar a estabilidade do mesmo contra os colapsos que modificam totalmente a frente de combustão, tanto na geometria quanto na distribuição de temperatura transversal. Logo, a influência da distribuição de temperatura imposta no combustível pelo dispositivo de ignição é clara nas características posteriores da frente de combustão. Porém, esta é totalmente dependente da ocorrência ou não de outros tipos de instabilidades no leito, como: colapsos, retrações acentuadas, diferenças granulométricas, perdas de calor para o meio, etc. Caso não ocorram essas instabilidades percebe-se que a frente se propaga segundo a distribuição inicial de temperatura responsável por sua formação. Essa informação é bastante valiosa, por exemplo, em processos como a combustão in-situ, onde o alto teor de inertes - e consequentes menores retrações do leito - no meio poroso por onde a frente se propaga permite que as suas características possam ser controladas pelo dispositivo de ignição da frente de combustão.

## Capítulo 5

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho analisou o comportamento da ignição e propagação da frente de combustão em combustíveis sólidos. Foram obtidos resultados condizentes com os trabalhos existentes na literatura e os resultados são de grande colaboração ao entendimento do comportamento da combustão co-corrente em leito fixo.

Em relação à influência da composição do combustível nas características da ignição do mesmo, foi possível realizar um mapeamento, para diferentes composições (criadas a partir de combustíveis sólidos simulados). Pôde-se observar que para maiores teores de material volátil (MV) na composição do combustível maior será a facilidade para a ignição homogênea do combustível e menores serão o tempo e temperatura de ignição do combustível. Em contrapartida para um maior teor de carbono fixo (CF) as chances de ignição homogênea são menores e mais lento será o início do processo, pois as reações deverão ocorrer na superfície do sólido (ignição heterogênea) resultando em maiores tempos e temperaturas de ignição. Observou-se também que aumentando-se a quantidade de materiais inertes no mesmo, o combustível aqueceu mais rápido mas foi necessária mais energia (maiores valores de temperatura) para o mesmo entrar em ignição. Porém, esse comportamento foi atenuado para maiores concentrações de CF no combustível. Além disso, foi observado que a ignição de um combustível rico em voláteis deve ser mais variável em relação a um combustível rico em CF e uma maior impureza (maior teor de cinzas - CZ) no combustível faz a temperatura de ignição variar ainda mais.

Concluiu-se, a partir dos resultados de propagação da frente, que ocorrem basicamente três estágios de combustão no leito. O primeiro deles é o estágio de ignição do combustível. O segundo estágio, sob um regime de combustão limitada pelo oxigênio, é o de propagação da frente sob altas taxas de retração do leito. Nesse estágio ocorrem a evaporação da água, desvolatilização e a oxidação do CF

bem como a possível oxidação de parte do MV que é liberado pelas altas temperaturas. O terceiro e último estágio é o de oxidação do CF remanescente, onde toda a umidade e o MV do combustível já foram varridos e apenas o CF, sob o regime de combustão limitada pela reação, sofre oxidação resultando em maiores temperaturas. A identificação e conhecimento desses três estágios são importantes para aumentar o desempenho de fornos e equipamentos que envolvam conversão térmica.

Através das análises de gás dos produtos gasosos formados pela reação do combustível realmente observou-se a existência de dois regimes de combustão presentes na célula. No início do experimento há uma tendência para a combustão limitada pelo oxigênio, uma vez que a quantidade de oxigênio na saída é zero ou próximo de zero. Já na parte final do experimento, observa-se a combustão limitada pela reação, visto que o oxigênio está presente em quantidade considerável na saída da célula.

Através de um método de identificação da retração do leito a partir da evolução de temperatura no tempo, pôde-se concluir que a retração do leito é mais acentuada para combustíveis ricos em MV e menos acentuadas para combustíveis ricos em materiais inertes. Uma maior vazão de ar exerce influência na retração do leito, acelerando o mecanismo. Assim, em fornos de grelha móvel, por exemplo, pode-se ajustar a velocidade da grelha ou a vazão de ar de acordo com o tipo de combustível a ser consumido de modo a aumentar o desempenho do forno.

Em relação à influência da ignição na propagação da frente observou-se que em leitos com alta porcentagem de material inerte, onde há maior estabilidade, há uma maior influência da ignição na frente de combustão. Para essa situação a geometria da frente possuía uma inclinação de  $38^\circ$  devido as influências das desuniformidades na ignição. Vazões de ar menores aumentam a estabilidade do leito e contribuem para o aumento da influência da ignição na frente de combustão. Esses resultados são de grande interesse na indústria da recuperação de petróleo através da combustão in-situ. Pode-se a partir de determinada fonte de ignição controlar a propagação da frente no reservatório e obter melhores resultados na produção do poço.



Assim, foi possível observar diversos fatores que afetam a ignição e propagação de uma frente de combustão. Esses conhecimentos são úteis em diversas aplicações e processos industriais.

Como propostas de trabalhos futuros pode-se citar alguns pontos de interesse como:

- Inserir no combustível sólido simulado algum óxido ou substância que gere no leito uma reação endotérmica. Desse modo, se poderá simular melhor um combustível com grandes quantidades desse tipo de substâncias, que provocam redução das temperaturas do leito, como por exemplo uma rocha reservatório de petróleo como o xisto betuminoso. Assim os resultados seriam mais abrangentes.
- Comparar os valores de cada composição simulada com combustíveis reais de mesma composição para se encontrar a diferença entre o real e o simulado.
- Encontrar os fatores que influenciam os regimes de combustão no leito.
- Encontrar se a estrutura da propagação da frente é *reaction leading* ou *reaction trailing* para diferentes composições do leito.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKKUTLU, I. Y.; YORTSOS, Y. C. The dynamics of in-situ combustion fronts in porous media. **Combustion and Flame**, v. 134, n. 3, p. 229–247, ago. 2003.

ALDUSHIN, A. P. Heat transfer and convection combustion regimes of porous systems with filtration of heat carrier. **Combustion, Explosion, and Shock Waves**, v. 26, n. 2, p. 180–187, 1990.

ALDUSHIN, A. New results in the theory of filtration combustion. **Combustion and Flame**, v. 94, n. 3, p. 308–320, ago. 1993.

ALDUSHIN, A. P.; RUMANOV, I. E.; MATKOWSKY, B. J. Maximal energy accumulation in a superadiabatic filtration combustion wave. **Combustion and Flame**, v. 118, n. 1-2, p. 76–90, jul. 1999.

BABRAUSKAS V. **Ignition Handbook**. Issaquah WA: Fire Science Publishers, 2003.

BAR-ILAN, A. et al. Transition from forward smoldering to flaming in small polyurethane foam samples. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 30, n. 2, p. 2295–2302, jan. 2005.

BINKAU, B.; WANKE, C.; KRAUSE, U. Influence of inert materials on the self-ignition of flammable dusts. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, nov. 2014.

BU, C. et al. Ignition behavior of single coal particle in a fluidized bed under O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> atmospheres: A combination of visual image and particle temperature. **Applied Energy**, v. 115, p. 301–308, fev. 2014.

CASTANIER, L. M.; BRIGHAM, W. E. Upgrading of crude oil via in situ combustion. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 39, n. 1-2, p. 125–136, ago. 2003.

CHIANG, K. Y.; JIH, J. C.; LIN, K. L. The effects of calcium hydroxide on hydrogen chloride emission characteristics during a simulated densified refuse-derived fuel combustion process. **Journal of Hazardous Materials**, v. 157, n. 1, p. 170–178, 2008.

CLEARY, T. G.; OHLEMILLER, T. J.; VILLA, K. The influence of ignition source on the flaming fire hazard of upholstered furniture. **Fire Safety Journal**, v. 23, n. 1, p. 79–102, jan. 1994.

DAI, J. et al. Piloted ignition and extinction for solid fuels. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 34, n. 2, p. 2487–2495, 2013.

DEBENEST, G.; MOURZENKO, V. V.; THOVERT, J.-F. Smouldering in fixed beds of oil shale grains: governing parameters and global regimes. **Combustion Theory and Modelling**, v. 9, n. 2, p. 301–321, 2005.

DI BLASI, C. et al. Oxidative degradation and ignition of loose-packed straw beds. **Fuel**, v. 78, n. 13, p. 1591–1598, 1999.

DONOHUE, N. et al. Influence of steam dilution on the ignition of hydrogen , syngas and natural gas blends at elevated pressures. **Combustion and Flame**, v. 162, p. 1126–1135, 2015.

DU, X. Ignition and combustion of coal particle streams. **Fuel**, v. 74, n. 4, p. 487–494, abr. 1995.

DU, X.; ANNAMALAI, K. The transient ignition of isolated coal particle. **Combustion and Flame**, v. 97, n. 3-4, p. 339–354, jun. 1994.

DUFFY, N. T. M.; EATON, J. A. Investigation of factors affecting channelling in fixed-bed solid fuel combustion using CFD. **Combustion and Flame**, v. 160, n. 10, p. 2204–2220, 2013.

DUQUE, J. V. F. **Um Novo Processo para Craqueamento Térmico: Produção de Hidrocarbonetos Com Alto Valor Agregado a Partir de Resíduos de Polietileno**. [Tese mestrado] UFES, 2013.

ESSENHIGH, R. H.; MISRA, M. K.; SHAW, D. W. Ignition of coal particles: A review. **Combustion and Flame**, v. 77, n. 1, p. 3–30, jul. 1989.

FARADAY, M.; LYELL, C. Report on the explosion at the Haswell Collieries, and on the means of preventing similar accidents. **Philosophical Magazine**, v. 26, p. 16–35, 1845.

FATEHI, M.; KAVIANY, M. Adiabatic reverse combustion in a packed bed. **Combustion and Flame**, v. 99, n. 1, p. 1–17, out. 1994.

GARCÍA, R. et al. Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. **Bioresource Technology**, v. 103, n. 1, p. 249–258, 2012.

GHABI, C. et al. **Bidimensional Numerical Model for Polyurethane Smoldering in a Fixed Bed**. 4th International Conference on Computational Heat and Mass Transfer. **Anais...** Paris-Cachan, França: 2005Disponível em: <<http://escholarship.org/uc/item/5st5w2gz.pdf>>

GÓMEZ, M. A. et al. CFD modelling of thermal conversion and packed bed compaction in biomass combustion. **Fuel**, v. 117, p. 716–732, 2014.

HARADA, T. Time to ignition, heat release rate and fire endurance time of wood in cone calorimeter test. **Fire and Materials**, v. 25, n. 4, p. 161–167, 2001.

HASAN, T. et al. Self-sustaining smouldering combustion of coal tar for the remediation of contaminated sand: Two-dimensional experiments and computational simulations. **Fuel**, v. 150, p. 288–297, jun. 2015.

HELLIER, P.; LADOMMATOS, N.; YUSAF, T. The influence of straight vegetable oil fatty acid composition on compression ignition combustion and emissions. **Fuel**, v. 143, p. 131–143, 2015.

HERMANSSON, S.; THUNMAN, H. CFD modelling of bed shrinkage and channelling in fixed-bed combustion. **Combustion and Flame**, v. 158, n. 5, p. 988–999, 2011.

HOBBS, M. L.; RADULOVIC, P. T.; SMOOT, L. D. Combustion and gasification of coals in fixed-beds. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 19, n. 6, p. 505–586, jan. 1993.

HOUIM, R. W.; ORAN, E. S. Structure and flame speed of dilute and dense layered coal-dust explosions. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, p. 1–9, 2015.

JIA, L. et al. Study of coal and coke ignition in fluidized beds. **Fuel**, v. 85, n. 5-6, p. 635–642, 2006.

JONES, J. C. On the role of times to ignition in the thermal safety of transportation of bituminous coals. **Fuel**, v. 79, n. 12, p. 1561–1562, 2000.

KALTHOFF, O.; VORTMEYER, D. Ignition/extinction phenomena in a wall cooled fixed bed reactor. **Chemical Engineering Science**, v. 35, n. 7, p. 1637–1643, jan. 1980.

KANNAN, P.; AL SHOAIBI, A.; SRINIVASAKANNAN, C. Energy recovery from co-gasification of waste polyethylene and polyethylene terephthalate blends. **Computers & Fluids**, v. 88, p. 38–42, dez. 2013.

KHOR, A. et al. Straw combustion in a fixed bed combustor. **Fuel**, v. 86, n. 1-2, p. 152–160, jan. 2007.

KIM, D. H. et al. Forest fire risk assessment through analyzing ignition characteristics of forest fuel bed. **Forest Ecology and Management**, v. 234, p. S31, 2006.

KOOKER, D. E.; HOWARD, S. L.; CHANG, L. M. **Convective ignition of a granular solid propellant bed: Influence of propellant composition**. 26th Symposium (International) on Combustion. **Anais...**1996

KUMAR, R. R.; KOLAR, A. K.; LECKNER, B. Shrinkage characteristics of Casuarina wood during devolatilization in a fluidized bed combustor. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, n. 2, p. 153–165, 2006.

LIANG, L. et al. Experimental study on effects of moisture content on combustion characteristics of simulated municipal solid wastes in a fixed bed. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 15, p. 7238–7246, 2008.

LIU, B. et al. An experimental investigation on the effect of convection on the ignition behaviour of single coal particles under various O<sub>2</sub> concentrations. **Fuel**, v. 116, p. 77–83, 2014.

MANZELLO, S. L. et al. Experimental investigation of firebrands: Generation and ignition of fuel beds. **Fire Safety Journal**, v. 43, n. 3, p. 226–233, 2008.

MARTINS, M. F. **The structure of a combustion front propagating in a fixed bed of crushed oil shale: co-current configuration**. [Tese doutorado] Université de Toulouse, 2008.

MARTINS, M. F. et al. Co-current combustion of oil shale - Part 2: Structure of the combustion front. **Fuel**, v. 89, n. 1, p. 133–143, jan. 2010.

MASON, P. E. et al. Single particle flame-combustion studies on solid biomass fuels. **Fuel**, v. 151, p. 21–30, 2015.

MONHOL, F. A. F.; MARTINS, M. F. Ignition by Thermal Radiation of Polyethylene and Human Feces Combustible Wastes: Time and Temperature to Ignition. **Advanced Materials Research**, v. 911, p. 373–377, jun. 2014.

MONHOL, F. A. F.; MARTINS, M. F. Cocurrent Combustion of Human Feces and Polyethylene Waste. **Waste and Biomass Valorization**, v. 6, n. 3, p. 425–432, 2015.

OHLEMILLER, T.; CLEARY, T.; SHIELDS, J. Effect of ignition conditions on upward flame spread on a composite material in a corner configuration. **Fire Safety Journal**, v. 31, n. 4, p. 331–344, nov. 1998.

OHLEMILLER, T. J. et al. Dynamic effects on ignitability limits of solidpropellants subjected to radiative heating. **Symposium (International) on Combustion**, v. 14, n. 1, p. 1297–1307, jan. 1973.

OHLEMILLER, T. J. Modeling of smoldering combustion propagation. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 11, n. 4, p. 277–310, jan. 1985.

OHLEMILLER, T. J. Smoldering combustion propagation through a permeable horizontal fuel layer. **Combustion and Flame**, v. 81, n. 3-4, p. 341–353, set. 1990.

OHLEMILLER, T. J. Smoldering Combustion. In: DINENNO, P. J. (Ed.). **SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (3rd Ed.)**. Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association, 2002. p. 200–210.

OHLEMILLER, T. J.; SUMMERFIELD, M. Radiative ignition of polymeric materials in oxygen/nitrogen mixtures. **Symposium (International) on Combustion**, v. 13, n. 1, p. 1087–1094, jan. 1971.

OTTAWAY, M. Use of thermogravimetry for proximate analysis of coals and cokes. **Fuel**, v. 61, n. 8, p. 713–716, 1982.

PAPADIKIS, K.; GU, S.; BRIDGWATER, A. V. CFD modelling of the fast pyrolysis of biomass in fluidised bed reactors: Modelling the impact of biomass shrinkage. **Chemical Engineering Journal**, v. 149, n. 1-3, p. 417–427, 2009.

PARK, S. H.; TIEN, C. L. Radiation induced ignition of solid fuels. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 33, n. 7, p. 1511–1520, 1990.

PIRONI, P. et al. Small-scale forward smouldering experiments for remediation of coal tar in inert media. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 32, n. 2, p. 1957–1964, 2009.

PORTEIRO, J. et al. Experimental analysis of the ignition front propagation of several biomass fuels in a fixed-bed combustor. **Fuel**, v. 89, n. 1, p. 26–35, 2010.

PORTEIRO, J. et al. Study of the reaction front thickness in a counter-current fixed-bed combustor of a pelletised biomass. **Combustion and Flame**, v. 159, n. 3, p. 1296–1302, 2012.

PRINS, W. et al. Devolatilization and ignition of coal particles in a two-dimensional fluidized bed. **Combustion and Flame**, v. 75, n. 1, p. 57–79, 1989.

REIN, G. et al. Modeling of one-dimensional smoldering of Polyurethane in microgravity conditions. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 30 II, n. 2, p. 2327–2334, 2005.

REIN, G. **Computational Model of Forward and Opposed Smoldering Combustion With Improved Chemical Kinetics**. [PhD Thesis] Berkeley, U C, 2005.

REINELT, D.; LAURS, A.; ADOMEIT, G. Ignition and Combustion of a Packed Bed in a Stagnation Point Flow Part II: Heterogeneous and Homogeneous Reactions. **Combustion and Flame**, v. 113, n. 3, p. 373–379, 1998.

REINELT, D.; LAURS, A.; ADOMEIT, G. Ignition and combustion of a packed bed in a stagnation point flow. **Combustion and Flame**, v. 99, n. 2, p. 395–403, nov. 1994.

RIAZA, J. et al. Single particle ignition and combustion of anthracite, semi-anthracite and bituminous coals in air and simulated oxy-fuel conditions. **Combustion and Flame**, v. 161, n. 4, p. 1096–1108, 2014.

RONNBACK, M. et al. Combustion Processes in a Biomass Fuel Bed-Experimental Results. In: A. V. BRIDGWATER (Ed.). **Progress in Thermochemical Biomass Conversion**. Oxford, UK.: Blackwell Science Ltd, 2001. p. 743–757.

RYU, C. et al. Effect of fuel properties on biomass combustion: Part I. Experiments - Fuel type, equivalence ratio and particle size. **Fuel**, v. 85, n. 7-8, p. 1039–1046, 2006.

RYU, C. et al. Ignition and burning rates of segregated waste combustion in packed beds. **Waste Management**, v. 27, n. 6, p. 802–810, 2007.

SABIA, P. et al. Effects of mixture composition dilution level and pressure on auto-ignition delay times of propane mixtures. **Chemical Engineering Journal**, v. 277, p. 324–333, 2015.

SCHULT, D. Propagation and extinction of forced opposed flow smolder waves. **Combustion and Flame**, v. 101, n. 4, p. 471–490, jun. 1995.

SHARIFI, V. N. **Optimization study of incineration in a incinerator with a vertical radiation shaft**. [PhD Thesis] Sheffield University, 1990.

SHIN, D. et al. Combustion characteristics of simulated gas fuel in a 30 kg/h scale pyrolysis-melting incinerator. **Waste Management**, v. 28, n. 11, p. 2422–2427, 2008.

SHIN, D.; CHOI, S. The combustion of simulated waste particles in a fixed bed. **Combustion and Flame**, v. 121, n. 1-2, p. 167–180, 2000.

SUN, C. L.; KOZINSKI, J. A. Ignition behaviour of pulp and paper combustible wastes. **Fuel**, v. 79, n. 13, p. 1587–1593, out. 2000.

SUN, C. L.; ZHANG, M. Y. Ignition of Coal Particles at High Pressure in a Thermogravimetric Analyzer. **Combustion and Flame**, v. 115, n. 1-2, p. 267–274, out. 1998.

SUN, R. et al. Numerical and experimental studies on effects of moisture content on combustion characteristics of simulated municipal solid wastes in a fixed bed. **Waste management (New York, N.Y.)**, v. 39, p. 166–78, maio 2015.

TAO, L. et al. Combustion characteristics of particles of hazardous solid waste mixtures in a fixed bed. **Journal of Hazardous Materials**, v. 181, n. 1-3, p. 305–314, 2010.

THUNMAN, H.; LECKNER, B. Co-current and counter-current fixed bed combustion of biofuel—a comparison☆. **Fuel**, v. 82, n. 3, p. 275–283, 2003.

VAN BLIJDERVEEN, M. et al. Spontaneous ignition of wood, char and RDF in a lab-scale packed bed. **Fuel**, v. 89, p. 2393–2404, 2010.

VAN BLIJDERVEEN, M.; BRAMER, E. A.; BREM, G. Modelling piloted ignition of wood and plastics. **Waste Management**, v. 32, n. 9, p. 1659–1668, 2012.

VAN BLIJDERVEEN, M.; BRAMER, E. A.; BREM, G. Modelling spontaneous ignition of wood, char and RDF in a lab-scale packed bed. **Fuel**, v. 108, p. 190–196, 2013.

VANTELON, J.-P. et al. Experimental observations on the thermal degradation of a porous bed of tires. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 30, n. 2, p. 2239–2246, jan. 2005.

VORTMEYER, D.; STAHL, R. Thermal radiation controlled ignition/extinction phenomena in a system of separated catalyst layers with exothermal chemical reaction. **Chemical Engineering Science**, v. 36, n. 8, p. 1373–1379, 1981.

VUTHALURU, H. B.; FRENCH, D. H. Mineralogical investigations into clinker formation and variations in deposit characteristics with time in a large-scale pc-fired boiler. **Fuel**, v. 150, p. 184–190, jun. 2015.

WALL, T. F. et al. Indicators of ignition for clouds of pulverized coal. **Combustion and Flame**, v. 72, n. 2, p. 111–118, 1988.

WANG, J. et al. Burning velocity and statistical flame front structure of turbulent premixed flames at high pressure up to 1.0 MPa. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 68, p. 196–204, 2015.

WANG, J.; CHAO, C. Y. H.; KONG, W. Experimental study and asymptotic analysis of horizontally forced forward smoldering combustion. **Combustion and Flame**, v. 135, n. 4, p. 405–419, dez. 2003.

WANG, Q.; ZHAO, Y.; ZHANG, Y. Shrinkage kinetics of large-sized briquettes during pyrolysis and its application in tamped coal cakes from large-scale chambers. **Fuel**, v. 138, p. 1–14, 2014.

WILDEGGER-GAISSMAIER, A. E.; JOHNSTON, I. A. N. R. L Bayonettgniter. **Combustion and Flameme**, v. 106, n. 95, p. 219–230, 1996.

YANG, Y. BIN et al. Fuel size effect on pinewood combustion in a packed bed. **Fuel**, v. 84, p. 2026–2038, 2005.

YANG, Y. B. et al. Effects of fuel devolatilisation on the combustion of wood chips and incineration of simulated municipal solid wastes in a packed bed. **Fuel**, v. 82, n. 18, p. 2205–2221, 2003.

YANG, Y. B.; SHARIFI, V. N.; SWITHENBANK, J. Effect of air flow rate and fuel moisture on the burning behaviours of biomass and simulated municipal solid wastes in packed beds. **Fuel**, v. 83, n. 11-12, p. 1553–1562, 2004.

YUAN, Y. et al. The transition of heterogeneous-homogeneous ignitions of dispersed coal particle streams. **Combustion and Flame**, v. 161, n. 9, p. 2458–2468, 2014.

ZHAO, J. P.; LOO, C. E.; DUKINO, R. D. Modelling fuel combustion in iron ore sintering. **Combustion and Flame**, v. 162, n. 4, p. 1019–1034, 2015.

ZHAO, X. et al. Prediction of coal stockpile autoignition delay time using micro-calorimeter technique. **Fuel Processing Technology**, v. 110, p. 86–93, 2013.

ZHOU, B. et al. Distributed reactions in highly turbulent premixed methane / air flames Part I . Flame structure characterization. **Combustion and Flame**, v. 162, p. 2937–2953, 2015.

ZHOU, Y. et al. Radiation attenuation characteristics of pyrolysis volatiles of solid fuels and their effect for radiant ignition model. **Combustion and Flame**, v. 157, n. 1, p. 167–175, 2010.

ZOU, C. et al. Ignition behaviors of pulverized coal particles in O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O mixtures in a drop tube furnace using flame monitoring techniques. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 35, p. 3629–3636, 2015.